SOMMAIRE

RESUME

ABSTRACT

REMERCIEMENTS

LISTE DES FIGURES……4

LISTE DES TABLEAUX…….....10

INTRODUCTION GENERALE……...11

CHAPITRE 1 : METHODES NON DESTRUCTIVES DE CARACTERISATION DU BETON…….14

1.1. Introduction ……...15
1.2. Les inspections visuelles…….…… ..15
1.3. Les essais non destructifs…… .16
1.4. Les essais d'ultrason et de la méthode de la fréquence de résonance …..…… ..17
1.4.1. Introduction.....17
1.4.2. Les essais ultrasons……..18
1.4.2.1.Les techniques acoustiques……....…….18
1.4.2.2.Définitions d'ondes acoustiques…….…….....18
1.4.2.3.Caractéristique des ondes acoustiques……..19
1.4.2.4.Différents types d'ondes…….....19
1.4.2.5.La production des ultrasons……..22
1.4.2.5.1. Les propriétés des ultrasons……...……..22
1.4.2.5.2. La vitesse d'impulsion d'ultrason (UPV)……...…….....23
1.4.2.5.3. Avantages et limites……...……..31
1.4.3. Méthode de la fréquence de résonance……..…….....31
1.4.3.1.Principe de mesure……...…….32
1.4.3.2.Procédure de contrôle……...33
1.4.3.3.Vibrations longitudinales…….33
1.4.3.4.Vibrations de flexion……....34
1.4.3.5.Vibrations de torsion……....35
1.4.3.6.Détermination des constantes dynamiques……...……...36
1.4.3.6.1. Mesures……..…….36
1.4.3.6.2. Module d'élasticité dynamique par vibrations longitudinales…….……...36
1.4.3.6.3. Module de cisaillement……...38

1.4.3.6.4. Module d'élasticité dynamique pour des vibrations de flexion…….....40
1.4.3.6.5. Coefficient de Poisson…….....……...40
1.5. Conclusion …….....……40

CHAPITRE 2 : PARAMETRES INFLUANT LES PROPRIETES DYNAMIQUES ET MECANIQUES DU BETON…….…….....42

2.1. Introduction 43
2.2. Influence des additions sur les modules d'élasticité statique et dynamique.....43
2.3. Influence des additions sur la résistance mécanique du béton……..……48
2.4. Influence des additions minérales sur la vitesse d'impulsion d'ultrason……..……..56
2.5. Relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression……60
2.6. Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique..…..63
2.7. Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression….....65
2.8. Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique…68
2.9. Relation entre la porosité et la résistance à la compression……..…….....70
2.10. Conclusion……72

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET DES BETONS ETUDIES……73

3.1. Introduction…….....…….....74
3.2. Caractéristiques physico-chimiques du ciment….....……....74
3.2.1. Composition chimique et minéralogique 74
3.2.2. Caractéristiques physico – mécaniques 75
3.2.2.1.La surface spécifique…….....……75
3.2.2.2.Essai de consistance.....75
3.2.2.3.Essai de prise.....75
3.2.2.4.Masses volumiques (apparente et absolue)…….....…….....76
3.2.2.5. Essais mécaniques sur les mortiers normalisés.....77
3.3. Granulats (gravier et sable)……...…….....……...77
3.3.1. Site de la carrière Djebel Abiod.....77
3.3.2. Morphologie du gisement 78
3.3.3. Mode d'extraction 78
3.3.4. Capacité de production 79
3.3.5. Identification des granulats 79
3.3.5.1.Analyse granulométrique 79
3.3.5.2.Masses volumiques apparentes et absolues 80
3.4. Additions minérales…….....81
3.5. Caractérisation des bétons étudiés…….....81
3.5.1. Méthode de Dreux-Gorisse 82

3.5.2. Méthode de Baron Lesage.....82
3.6. Programme expérimental……..…….....83
3.6.1. Essais sur bétons……..……..……....83
3.6.1.1.Essais réalisées sur béton à l'état frais.....84
3.6.1.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams 84
3.6.1.1.2. Malaxage et confection des éprouvettes……....……..…...84
3.6.1.2.Essais réalisées sur béton à l'état durcis.....86
3.6.1.2.1. Résistance à la compression……...…….....……..86
3.6.1.2.2. Porosité accessible à l'eau…….....…..87
3.7. Méthodes d'essais utilisées.....……..……88
3.7.1. La vitesse d'impulsion d'ultrason……...…….....……...88
3.7.1.1.Appareillage et méthodologie …….....…….....…….....89
3.7.2. Propriétés dynamiques……89
3.7.2.1.Appareillage…….....……...89
3.7.3. Module d'élasticité statique……...…....……....89
3.8. Conclusion…….....……..90

CHAPITRE 4 : PRESENTATION ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS …....91

4.1. Introduction.....92
4.2. Résultats et discussion 92
4.2.1. Influence des additions sur le module d'élasticité dynamique 92
4.2.2. Influence des additions sur le module de rigidité dynamique 94
4.2.3. Influence des additions sur le coefficient de Poisson……...……....96
4.2.4. Influence des additions sur la résistance à la compression 98
4.2.5. Influence des additions sur la vitesse d'impulsion d'ultrason…..……..……101
4.2.6. Effet des additions minérales sur l'évolution de La porosité……....……103
4.2.7. Relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression….....105
4.2.8. Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique……..……...106
4.2.9. Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression.....……...……107
4.2.10. Relation entre le module d'élasticité statique et le module d'élasticité dynamique.....108
4.2.11. Relation entre la porosité el la résistance à la compression……....…...…..109
4.3. Conclusion .....…110

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES……..112

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES……...…….……115

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schématisation d'un milieu élastique……19

Figure 1.2 : Catégorie d'onde acoustique…….....19

Figure 1.3 : La longueur d'onde λ……...…….....19

Figure 1.4 : Onde longitudinale [Corapcioglu et al., 1996]……..…….21

Figure 1.5 : Onde transversale [Corapcioglu et al., 1996]……...…….21

Figure 1.6 : Onde de Rayleigh……...…….....22

Figure 1.7 : Schéma de la méthode de vitesse ultrasonore…….....23

Figure 1.8 : Transmission directe…….....24

Figure 1.9 : Transmission indirecte…….....25

Figure 1.10 : Schéma pour la mesure de la profondeur de fissure de surface h…….....25

Figure 1.11 : Transmission semi-directe……...…….25

Figure 1.12 : Béton de référence de qualité acceptable…….....26

Figure 1.13 : Bonne qualité – Haute résistance…….26

Figure 1.14 : Haute teneur en granulats fins. Faible teneur en granulats grossiers……....26

Figure 1.15 : Haute teneur en granulats grossiers. Faible teneur en granulats fins……....27

Figure 1.16 : Défaut à la surface. Couplage médiocre……27

Figure 1.17 : Mesure à travers l'armature métallique…….....27

Figure 1.18 : Défauts, nids, vides…….....27

Figure 1.19 : Utilisation de la méthode de surface pour déterminer la profondeur de détérioration t…….....…….....28

Figure 1.20 : Effet des agrégats fins : proportions agrégées grossières sur la relation entre la vitesse de l'impulsion et la résistance à la compression [Jones, 1969]…….....29

Figure 1.21 : L'appareil ERUDITE …….....…….32

Figure 1.22 : Positionnement des transducteurs pour une vibration longitudinale…….....33

Figure 1.23 : Mode fondamental pour une vibration longitudinale……33

Figure 1.24 : Position des transducteurs pour une mesure de vibration de flexion [Bordas, 1983]…….....……34

Figure 1.25 : Mode fondamental pour une vibration de flexion avec les nœuds à 0,224L des extrémités…….....…….……..35

Figure 1.26 : Relation entre amplitude de fréquence pour une poutre de béton à proximité de la résonance [Bordas, 1983]…….....……...35

Figure 1.27 : Position des transducteurs pour une mesure de vibration de torsion…….....35

Figure 1.28 : Propagation des ondes longitudinales ……36

Figure 1.29 : Schéma de l'appareil fonctionnant par vibration mécanique torsionnelle……...38

Figure 1.30 : Propagation des ondes de cisaillement…….…….....38

Figure 2.1 : Module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression des bétons durcis normaux avec et sans laitier [Wainwringt et al., 1986] …….....43

Figure 2.2 : Influence de la fumée de silice sur le module d'élasticité [Güneyisi et al., 2004]…….....……..44

Figure 2.3 : Evolution du module d'élasticité dynamique du béton en fonction de l'âge contenant des composites cimentaires [Ikbal khan, 2012]…….....….....45

Figure 2.4 : Evolution du module d'élasticité dynamique en fonction du type d'addition [Giner et al., 2012]…….....……...45

Figure 2.5 : Evolution du module d'élasticité dynamique du mélange M1 en fonction du temps [Shariq et al., 2013]……..……46

Figure 2.6 : Evolution du module d'élasticité dynamique du mélange M2 en fonction du temps [Shariq et al., 2013]……..……46

Figure 2.7 : Evolution du module d'élasticité dynamique du mélange M3 en fonction du temps [Shariq et al., 2013]…….…….....47

Figure 2.8 : Influence des fillers calcaires sur le module d'élasticité dynamique E_d (w/c=0.5) [El Bahi et al., 2016]…….....47

Figure 2.9 : Influence de la pouzzolane naturelle sur le module d'élasticité dynamique E_d (w/c=0.5) [El Bahi et al., 2016]…….....48

Figure 2.10 : Résistance à la compression à différents âges pour les bétons de ciment à laitier entraînés par l'air : W/(C+ S) = 0,4 [Hogan., 1981]…….....48

Figure 2.11 : Résistance à la compression à différents âges pour les bétons de ciment à laitier entraînés à l'air :W / (C+ S) = 0,55 [Hogan., 1981]…….…….....49

Figure 2.12 : Performance de résistance à la compression pour tous les mélanges [Toutanjia et al., 2004]…….…….....…....50

Figure 2.13 : Influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression [Ghrici et al., 2006]…..…….....…...51

Figure 2.14 : Influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression [Mouli., 2008]…….…….....…..52

Figure 2.15 : L'effet du calcaire sur la résistance à la compression à différents âges [Ramezanianpour et al., 2010]…….....……52

Figure 2.16 : Influence de la fumée de silice sur la résistance à la compression [Giner et al., 2011]……...…….…….....53

Figure 2.17 : Evolution de la résistance à la compression en fonction des fillers calcaires [Bederina et al., 2011]…….....53

Figure 2.18 : Evolution de la résistance à la compression des bétons auto-plaçants à base de fillers calcaires (15 et 25%) [Celik et al., 2015]….…….....54

Figure 2.19 : Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression f_{cu} (w/c=0.5) [El Bahi et al., 2016].....55

Figure 2.20 : Influence de la pouzzolane sur la résistance à la compression f_{cu} (w/c=0.5) [El Bahi et al., 2016].....….....55

Figure 2.21 : Influence de la fumée de silice sur l'UPV pour un BAP [Ulucan et al., 2008]…….....…….…..56

Figure 2.22 : Résultats des UPV pour SCC avec FA pour différentes durées de maturation [Ulucan et al., 2008]…….....…….....….....57

Figure 2.23 : Vitesse d'impulsion ultrasonore du béton contenant des composites cimentaires [Iqbal Khan, 2012]…….....57

Figure 2.24 : Evolution de l'UPV du béton avec l'âge pour le groupe de mélange M1 [Shariq et al., 2013]…….…….....……...58

Figure 2.25 : Evolution de l'UPV du béton avec l'âge pour le groupe de mélange M2 [Shariq et al., 2013]…….…….....……....59

Figure 2.26 : Evolution de l'UPV du béton avec l'âge pour le groupe de mélange M3 [Shariq et al., 2013]…….…….....……....59

Figure 2.27 : Relations entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression pour différents types de ciment [Han et al., 2004]……..….…60

Figure 2.28 : Relations entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression pour différentes températures de durcissement [Han et al., 2004]…….....61

Figure 2.29 : Relations entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression pour différents âges [Han et al., 2004]…….…….….....61

Figure 2.30 : Evolution du module d'élasticité dynamique en fonction de la résistance à la compression [Megat Johari et al., 2011]…….....…….....62

Figure 2.31 : Relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression [Iqbal Khan, 2012]……..……..…….....63

Figure 2.32 : Relation entre les modules d'élasticité dynamique et statique pour deux types de ciment et un murissement à 23 °C [Han et al., 2004)]…….....64

Figure 2.33 : La relation entre les modules d'élasticité statique et dynamique [Megat Johari et al., 2011]…….....……....65

Figure 2.34 : Relation entre l'UPV et la résistance à la compression pour tous les résultats entre 3 et 120 jours de périodes de durcissement pour FA, BFS et FA + BFS [Demirboga., 2004]……..…….....….....65

Figure 2.35 : Corrélation entre l'UPV et la résistance à la compression pour un BAP avec FA [Ulucan et al., 2008]……...…….…….....66

Figure 2.36 : Corrélation entre l'UPV et la résistance à la compression pour un BAP avec SF [Ulucan et al., 2008]…….....66

Figure 2.37 : Relation entre la vitesse de l'impulsion ultrasonique et la résistance à la compression [Iqbal Khan, 2012]……...…….....67

Figure 2.38 : Relation entre la vitesse de l'impulsion ultrasonore (UPV) et le module d'élasticité [Vasconcelos et al., 2008]…...…. …….....68

Figure 2.39 : Courbe maître des mélanges évalués à la température de 22° [Norambuena-Contreras et al., 2010]..…….....69

Figure 2.40 : Corrélation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason en fonction du module d'élasticité dynamique [Iqbal Khan, 2012]……...…….....69

Figure 2.41 : Classes de durabilité « potentielle » et valeurs expérimentales de porosité accessible à l'eau en fonction de la résistance [Baroghel-Bouny, 2013]…….....70

Figure 2.42 : Relation entre la porosité et la résistance à la compression en fonction de l'âge pour le BAP maturé à l'eau de mer [Erniatia et al., 2015]…….....71

Figure 2.43 : Relation entre la résistance à la compression et la porosité du matériau à base de ciment [Erniatia et al., 2015]…….....71

Figure 3.1 : Perméabilimètre de Blaine Manuel…….....75

Figure 3.2 : Appareil de Vicat utilisé pour la mesure de la consistance et le temps de prise nécessaire du ciment.…...……...….....…….....…….....76

Rapport-Gratuit.com

Figure 3.3 : Plan de situation du gisement de Djebel Abiod…….....78

Figure 3.4 : Morphologie du gisement de la carrière de DjebelAbiod……...……78

Figure 3.5 : Mode d'extraction des granulats……..….....79

Figure 3.6 : Différents produits de la carrière…….....……..……..79

Figure 3.7 : Courbes granulométriques des granulats……...…….....80

Figure 3.8 : Courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse…….....82

Figure 3.9 : Test d'affaissement..……..……...……..84

Figure 3. 10 : Essai d'affaissement au Cône d'Abrams sur le béton étudié…….……..…....85

Figure 3.11 : Confection et vibration des éprouvettes 16x32 cm^2de béton ....……..85

Figure 3.12 : Arasement d'une surface d'éprouvette 16x32cm^2……...……..…...86

Figure 3.13 : Conservation des éprouvettes (bassin d'eau normalisée)……...……...86

Figure 3.14 : Une presse hydraulique……...……...……...87

Figure 3.15 : Rectifieuse (surfaçage des éprouvettes)..……..……87

Figure 3. 16 : Dispositif de la porosité accessible à l'eau……...……..….....88

Figure 3.17 : Essai de la vitesse d'impulsion d'ultrason sur une éprouvette de béton……88

Figure 3.18 : Procédé PunditLab Testeur de béton à vitesse d'impulsion ultrasonique….....89

Figure 3.19 : Machine hydraulique universelle 90

Figure 4.1 : Influence de la fumée de silice sur le module d'élasticité dynamique E_d……93

Figure 4.2 : Influence du laitier de haut fourneau sur le module d'élasticité dynamique E_d.....93

Figure 4.3 : Influence des fillers calcaires sur le module d'élasticité dynamique E_d……....94

Figure 4.4 : Influence de la pouzzolane naturelle sur le module d'élasticité dynamique E_d…..94

Figure 4.5 : Influence de la fumée de silice sur le module de rigidité dynamique G_d……95

Figure 4.6 : Influence du laitier de haut fourneau sur le module de rigidité dynamique G_d.....95

Figure 4.7 : Influence des fillers calcaires sur le module de rigidité dynamique G_d……....96

Figure 4.8 : Influence de la pouzzolane naturelle sur le module de rigidité dynamique G_d…..96

Figure 4.9 : Effet de la fumée de silice sur l'évolution du coefficient de Poisson……..97

Figure 4.10 : Effet du laitier de haut fourneau sur l'évolution du coefficient de Poisson……97

Figure 4.11 : Effet des fillers calcaires sur l'évolution du coefficient de Poisson……..98

Figure 4.12 : Effet de la pouzzolane naturelle sur l'évolution du coefficient de Poisson……..98

Figure 4.13 : Influence de la fumée de silice sur la résistance à la compression f_{cu}…….....99

Figure 4.14 : Influence du laitier de haut fourneau sur la résistance à la compression f_{cu}….....99

Figure 4.15 : Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression f_{cu}……..100

Figure 4.16 : Influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression f_{cu}……..100

Figure 4.17 : Influence de la fumée de silice sur la vitesse d'impulsion d'ultrason V……....101

Figure 4.18 : Influence du laitier de haut fourneau sur la vitesse d'impulsion d'ultrason V….102

Figure 4.19 : Influence des fillers calcaires sur la vitesse d'impulsion d'ultrason V…….....102

Figure 4.20 : Influence de la pouzzolane naturelle sur la vitesse d'impulsion d'ultrason V….103

Figure 4.21 : Effet de la fumée de silice sur la porosité en fonction du temps…….....103

Figure 4.22 : Effet du laitier de haut fourneau sur la porosité en fonction du temps……104

Figure 4.23 : Effet des fillers calcaires sur la porosité en fonction du temps……104

Figure 4.24 : Effet de la pouzzolane naturelle sur la porosité en fonction du temps……105

Figure 4.25 : Relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression.....106

Figure 4.26 : Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique……...…….....107

Figure 4.27 : Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression…….…….....108

Figure 4.28 : Relation entre le module d'élasticité statique et le module d'élasticité dynamique……...…….....….....109

Figure 4.29 : Relation entre la porosité et la résistance à la compression pour l'âge de 28, 56, et 90 jours……..…….....110

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des différentes méthodes non destructifs……..16

Tableau 2.1 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge [Mazloom et al., 2004].....49

Tableau 2.2 : La résistance à la compression des bétons à base du laitier de haut fourneau [Demirboga et al., 2004]…….....……50

Tableau 2.3 : Effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression du béton à différents âges [Debouchaa et al., 2015]…….....54

Tableau 2.4 : Caractérisation des BAP en fonction du type et du taux des additions [Taleb et al., 2017]…….....….....56

Tableau 2.5 : Les relations entre les modules d'élasticité statique et dynamique [(Lydon et al., 1986), (CP110, 1972), (Popovics, 1975) et (Swamy et al., 1975)]…….....63

Tableau 2.6 : Les relations entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression sur les deux types d'éprouvettes de béton [Mohd Shariq et al., 2013)……67

Tableau 3.1 : Composition chimique du ciment (%)……..74

Tableau 3.2 : Composition de Bogue minéralogique du ciment (%)……..74

Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques du ciment……..……....76

Tableau 3.4 : Caractéristiques mécaniques du ciment……77

Tableau 3.5 : Caractérisation des granulats……....80

Tableau 3.6 : Les caractéristiques physico-chimiques des différentes poudres utilisées……81

Tableau 3.7 : Différents types de bétons……..……...…...83

INTRODUCTION GENERALE

Les méthodes utilisées pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou dans les ouvrages sont généralement basées sur des essais destructifs réalisés sur des éprouvettes in situ. Les principaux inconvénients de ces méthodes résident dans le fait que les résistances mécaniques des éprouvettes en béton peuvent être différentes du béton de l'ouvrage à cause de la cure ou des moyens de serrage. Ajoute à cela, l'effet d'échelle, et de la forme des éprouvettes (Soutsos M et al, 2009). En plus, il faut attendre toute une période de maturation pour obtenir les résultats des essais destructifs.

Avec cette grande frénésie de construire et l'accroissement exponentiel incessant de chantiers qui voient le jour avec une vitesse incroyable, il devient plus que nécessaire, même indispensable de trouver des moyens simples, et surtout rapides pour le contrôle et l'évaluation de la résistance du béton in situ.

D'une manière générale, il existe deux catégories de méthodes non destructives pour le béton. La première classe consiste aux méthodes utilisées pour estimer la résistance, les techniques de dureté de surface, de résistance à la pénétration, de retrait, de rupture, d'arrachement et de maturité dont certaines de ces méthodes ne sont pas vraiment non destructives car elles causent des dommages superficiels. La deuxième classe comprend les méthodes qui mesurent d'autres caractéristiques du béton telles que la teneur en humidité, la densité, l'épaisseur, la résistivité et la perméabilité. Des méthodes telles que la propagation des ondes de contrainte, le radar de sondage au sol et les techniques de thermographie infrarouge, sont aussi incluses dans cette deuxième classe, qui servent à localiser des délaminages, des vides et des fissures dans le béton. En plus, il existe des méthodes qui peuvent fournir l'information sur le renforcement en acier, comme l'emplacement des armatures, leurs dimensions et leurs caractéristiques (V. Mohan Malhotra Nicholas J. Carino 2004).

La mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est l'une des techniques non destructives qui reste très avantageuse pour caractériser l'état des matériaux. Elle sera employée pour déterminer la qualité du béton grâce à des modèles d'analyse de régression entre la résistance à la compression et les valeurs ultrasonores de la vitesse d'impulsion. Le procédé de mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique se base sur la propagation des ondes de contrainte et consiste à mesurer le temps de passage d'une impulsion d'ondes ultrasonores sur une longueur connue (ASTM C597).

Certaines caractéristiques du béton sont indispensables lors de la conception et le contrôle des ouvrages. Parmi ces caractéristiques, on distingue le module d'élasticité longitudinale, le module d'élasticité transversale ainsi que le coefficient de Poisson.

Le module d'élasticité dynamique est considéré comme étant sensiblement égal au module d'élasticité tangent à l'origine déterminé dans les essais statiques. Le module d'élasticité dynamique est facile à mesurer grâce à une estimation du module statique.

A cet effet, le banc d'essai « Erudit » reste un moyen efficace qui se base sur la méthode de fréquence de résonance pour la mesure des caractéristiques dynamiques (module d'élasticité dynamique, module de cisaillement dynamique et coefficient de Poisson). La fréquence propre de vibration est une propriété dynamique importante de tout système élastique. Ainsi, le module d'élasticité dynamique d'un matériau peut être déterminé à partir de la mesure de la fréquence naturelle de vibration des barres prismatiques et des relations mathématiques qui existent entre les deux.

Toutefois, comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton mais selon leurs propriétés ils peuvent aussi affecter la durabilité et les performances structurales du béton.

Les granulats coûtent beaucoup moins cher que le ciment, il devient alors économique d'en inclure la plus grande quantité possible dans le béton. Cependant l'aspect économique n'est pas l'unique raison qui explique l'utilisation des granulats. Ces derniers confèrent au béton une plus grande stabilité sur le plan volumétrique et peuvent participer dans l'amélioration de durabilité des bétons (Neville, 2000).

Par ailleurs, les additions minérales peuvent aussi modifier la nature et la texture des hydrates formés. La spécification, la formulation, la production et la mise en œuvre du béton ont évolué depuis la mise en place en 2004 de la norme EN 206-1 avec ses approches performantielles. Dans ce contexte, le formulateur a des obligations en ce qui concerne les dosages des constituants (eau, ciment, additions) selon l'environnement de l'ouvrage pour lequel le béton est destiné. Le marché de la construction a donc lui aussi évolué pour adopter une approche plus rationnelle basée sur des considérations de qualité de vie, de qualité dans l'acte de construire et de durabilité des ouvrages

L'incorporation des additions minérales dans les mélanges granulaires est devenue nécessaire pour améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Ces additions minérales peuvent parfois affecter de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires (Taleb O. et al., 2017), qui est parfaitement liée à la résistance ou encore plus à la durabilité. Néanmoins, pour profiter pleinement de ces avantages, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de ces composantes minérales ainsi que leurs actions sur les propriétés des bétons.

Cette étude s'inscrit dans cette optique et porte sur l'influence de la nature et du taux de substitution de plusieurs additions minérales sur les propriétés mécaniques, dynamiques et de durabilité des bétons ordinaires à plusieurs échéances. Les différentes additions minérales

traitées dans cette étude sont : la fumée de la silice (FS), les laitiers de haut fourneau (LHF), les fillers calcaires (FC) et la pouzzolane naturelle (PN) alors que les propriétés dynamiques, mécaniques et de durabilité étudiées se résument à la vitesse d'impulsion d'ultrason (UPV), les modules d'élasticité dynamique et statique (E), la résistance à la compression ainsi que l'évolution de la porosité.

Par ailleurs, les normes disponibles indiquent que les dispositions appropriées sur l'influence potentielle des ajouts sur l'estimation de la vitesse d'impulsion d'ultrason et du module d'élasticité font l'objet de plusieurs recherches. Par conséquent, ce travail vise à évaluer certaines relations normalisées sur la prédiction de la vitesse d'impulsion d'ultrason et sur les modules d'élasticité des bétons avec ajouts.

Cette étude a aussi pour objectif de déterminer des corrélations entre les grandeurs mécaniques et dynamiques évaluées par des essais destructifs et non destructifs sur des bétons à base de matériaux locaux, notamment entre le module d'élasticité dynamique, le module d'élasticité statique, la résistance mécanique et la vitesse d'impulsion d'ultrason.

Après cette introduction, la présente étude s'articule autour des chapitres suivants :

- Le premier chapitre concerne une étude bibliographique sur les méthodes non destructives utilisées pour le matériau béton tout en insistant sur les deux principales méthodes utilisées dans cette étude à savoir la vitesse d'impulsion d'ultrason et la fréquence de résonance.
- Le deuxième chapitre est consacré à un état de l'art sur les paramètres qui ont une influence sur les propriétés mécaniques, dynamiques et durabilité du béton. Une autre partie qui met en évidence les principales relations existantes entre les modules d'élasticité statique et dynamique, les modules d'élasticité dynamique et les résistances à la compression, la vitesse d'impulsion d'ultrason et les résistances à la compression, la vitesse d'impulsion d'ultrason et les modules d'élasticité dynamique est aussi introduite dans ce chapitre.
- Le troisième chapitre traitera les caractéristiques physico-mécaniques du ciment utilisé, des additions minérales et l'identification des propriétés des granulats. La caractérisation des bétons étudiés est aussi introduite dans ce chapitre.
- Le quatrième chapitre est consacré aux résultats relatifs au programme expérimental élaboré.
- Ce travail est terminé par une conclusion générale regroupant l'ensemble des résultats trouvés avec quelques perspectives pour d'autres recherches.

CHAPITRE 1

METHODES NON DESTRUCTIVES DE CARACTERISATION DU BETON

1.1. Introduction ……..…….....……..……...…...15

1.2. Les inspections visuelles…….....….…….…….....15

1.3. Les essais non destructifs…….....….……..... 16

1.4. Les essais d'ultrason et de la méthode de la fréquence de résonance ….....…...17

1.4.1. Introduction……...……..17

1.4.2. Les essais d'ultrason……...…….....……...18

1.4.3. La méthode de la fréquence de résonance……...…….....…..31

1.5. Conclusion …….....…….....40

1.1. Introduction

Le contrôle par des essais destructifs des échantillons de béton n'est pas totalement efficace, car ces éprouvettes prélevées ne représentent pas réellement le matériau la structure, ce constat conduit à chercher et développer d'autres essais qui se basent sur des méthodes non destructives. Plus de 100 méthodes non destructives ont été recensées par le comité Technique « Non Destructive Evaluation » dans une revue publiée en 2000 par [Burghardt, 2000].

Ce chapitre site d'une manière générale les différentes méthodes non destructives existantes pour la caractérisation du béton. Les essais non destructifs sont répartis en deux classes [Malhotra et al., 2004] : La première classe comprend les méthodes utilisées pour estimer la résistance, les techniques de dureté, de résistance à la pénétration, de retrait, de rupture et de maturité. Certaines de ces méthodes ne sont pas vraiment non destructrices parce qu'elles causent des dégâts superficiels. La deuxième classe comprend les méthodes qui mesurent d'autres caractéristiques du béton telles que la teneur en humidité, la densité, l'épaisseur, la résistivité et la perméabilité. Les techniques de propagation de l'onde et de thermographie infrarouge, qui sont utilisées pour localiser, les vides et les fissures dans le béton sont également inclus dans cette deuxième classe.

Par ailleurs, le choix de n'importe quelle méthode se limite à des critères bien définis. Dans Notre travail nous avons choisis deux méthodes, d'une part, la méthode de la vitesse d'impulsion d'ultrason, basée sur la vitesse de propagation des ondes élastiques dans un matériau, son application est simple et facile dans n'importe qu'elle géométrie du béton et l'essai permet d'estimer la résistance à la compression (propriété mécanique), le module d'élasticité du béton et le coefficient de Poisson. D'autre part, la méthode de la fréquence de résonance, à cause de son caractère non destructif, et sa capacité de déterminer les propriétés dynamiques du béton. Une présentation détaillée de ces deux méthodes fera l'objet de ce chapitre.

1.2. Les inspections visuelles

Une inspection visuelle est la première étape nécessaire pour l'évaluation d'une structure en béton, et le premier moyen de contrôle non destructif pour la reconnaissance et le diagnostic des ouvrages en béton armé. Elle permet de fournir immédiatement des données utiles et globales sur le degré de détérioration visible, comme l'écaillage des surfaces de béton, l'apparition de la fissuration et des défauts, la corrosion avancée des armatures, etc. Les données observées peuvent être utilisées dans les méthodes d'aides à la décision afin d'établir un diagnostic global d'un ouvrage [Taillandier et al., 2013].

La limitation de l'inspection visuelle est que seules les surfaces visibles peuvent être inspectées. Les défauts internes passent inaperçus et aucune information quantitative n'est obtenue sur les propriétés du béton. Pour ces raisons, une inspection visuelle est habituellement complétée par une ou plusieurs des autres méthodes non destructives décrites dans ce chapitre.

Les progrès technologiques récents permettent de soutenir cette méthode, en offrant des capteurs complémentaires de l'œil (appareils numériques), des moyens d'enregistrement (pour un suivi dans le temps) ainsi que des procédés d'analyse d'image pour l'interprétation. Cette méthode reste néanmoins très subjective puisque les résultats sont étroitement liés à l'expérience et au jugement de l'inspecteur.

1.3. Les essais non destructifs

Le tableau 1.1 énumère les principales méthodes non destructives et en fait le résumé de leurs avantages et inconvénients. À l'aide de ce tableau, on sélectionne les méthodes d'auscultation qui sont les plus efficaces pour notre étude.

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des différentes méthodes non destructives.

Méthodes	Application	Avantages	Inconvénients
Vitesse d'impulsion d'ultrason (UPV) [Malhotra et al., 2004]	Taux d'endommagement et résistance en compression du béton.	Rapide et facile à utiliser, peut être utilisée sur n'importe quelle géométrie.	La vitesse est affectée en fonction des propriétés du béton, du taux d'armature et de la taille des fissures. Ne donne pas des résultats en temps réel et est difficile à interpréter avec des géométries complexes.
La fréquence de résonance [Malhotra et al., 2004]	Calculer le module d'élasticité dynamique du béton et le coefficient de Poisson.	Rapide et facile à utiliser.	le mélange et les propriétés des granulats, l'effet de la taille d'échantillon et l'influence du mûrissement.
Scléromètre [Malhotra, 2006]	Résistance en compression du béton.	Rapide et facile à utiliser.	La texture de la surface, la dimension, la forme et la rigidité de l'échantillon, l'âge et l'humidité du béton, le type de ciment, le type de gros granulat et la carbonatation de la surface du béton durci.
Résistance à la pénétration [Malhotra, 2006]	La qualité et la résistance à la compression du béton in situ en mesurant la profondeur de pénétration.	Simple à utiliser.	La proportion du mélange, humidité interne et le mûrissement.
Maturométrie [Neville, 2000] et [Malhotra et al., 2004]	La résistance au jeune âge du béton dans l'ouvrage (sur les structures existantes).	Fournit une procédure simple pour prendre en compte les effets de la température et du temps.	Un essai coûteux.
Radiographie (ou gammagraphie) [Lacroix et al., 2002]	Localisation d'éléments plus dense ou moins dense que le béton comme des barres d'armatures, ou la présence d'un vide et nids d'abeilles dans le béton structural.	permette de visualiser l'intérieur des structures (des vides dans les conduits de précontrainte).	Le coût élevé du matériel, la technique onéreuse, le danger de l'équipement à haute tension et les radiations. Aussi, la présence de sources intenses de rayonnements impose une distance de radioprotection très importante et par conséquent son utilisation est limitée en zone urbaine.
Impact-écho [Schubert et al., 2008]	Localisation des délaminations du béton.	Localiser les fissures.	Ne donne pas de résultats en temps réel et elle nécessite une surface plane et allongée.

Résistivité électrique [Whiting et al., 2003]	Mesure la qualité du béton.	Facile à utiliser, détecte les fissures et donne de l'information sur l'état de l'acier.	Ne donne pas de résultats en temps réel et dépend de la teneur en eau.
Magnétisme [Malhotra, 1976]	Mesure l'endommagement dans les matériaux qui sont bons conducteurs.	Facile à utiliser.	Détecte mal les défauts dans les matériaux moins conducteurs (béton et des matériaux polymères renforcés de fibres).
Géoradar [Conyers et al., 1998]	Les ondes électromagnétiques qui sont réfléchies à l'interface de deux matériaux caractérisent la qualité des matériaux.	Évaluation en deux et en trois dimensions et couvre de grandes surfaces.	Affectée par l'acier d'armature et le coût de l'équipement est très élevé.
Thermographie infrarouge. [Taillade et al., 2011]	Détecte et localise des défauts dans le béton.	Facile à utiliser et permet la localisation des défauts en surface.	Peu de précision, profondeur d'investigation limitée et équipement très coûteux.
Réponse impulsionnelle [Davis et al., 2001]	Permet de mesurer la longueur, la rigidité et de détecter les variations de la section des éléments de béton	Facile à utiliser	Ne donne pas de résultats en temps réel et ne donne pas d'informations concernant la profondeur des défauts
Emission acoustique (AE) [Grosse et al., 2008]	Détecte et localise les défauts dans les matériaux.	Localise en trois dimensions et donne des résultats en temps réel.	Interprétation des résultats difficile surtout pour des éléments anisotropes.

1.4. Les essais d'ultrason et la méthode de la fréquence de résonance

1.4.1. Introduction

La nature évolutive du béton au fil du temps, nous impose un contrôle continu et permanent à cause de l'hétérogénéité de ces constituants et de ces ingrédients (agrégats, ciment, eau, adjuvant minéral et organique). La technique de la vitesse d'impulsion d'ultrason (UPV) est l'une des techniques de l'auscultation sonique utilisée pour contrôler cette évolution au cours du temps. Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. La méthode de fréquence de résonance est aussi un autre moyen efficace car le béton renferme des oscillations microscopiques propres à lui, et le fait d'atteindre ces oscillations par un agent extérieur induit une résonance de vibration qui reste l'élément clé dans la dynamique des matériaux ou encore pour la statique si on arrive à relier les caractéristiques dynamiques à celles statiques.

Rapport-Gratuit.com

1.4.2. Les essais ultrasons

1.4.2.1. Les techniques acoustiques

Il existe trois techniques acoustiques pour évaluer le béton, nous avons : Les ultrasons (auscultation sonique ou ultrasonique pulse velocity (UPV)) c'est ce que nous avons utilisée dans le cadre de notre étude; L'impact-écho; L'émission acoustique.

La méthode de la vitesse d'impulsion (UPV) est une méthode vraiment non destructive, car la technique utilise des **ondes mécaniques**, ce qui n'entraîne aucun dommage sur l'élément en béton testé. Un échantillon peut être testé à plusieurs reprises au même endroit, ce qui est utile pour surveiller le béton subissant des changements structurels internes sur une longue période de temps.

1.4.2.2. Définitions d'ondes acoustiques

Les ultrasons sont des **ondes acoustiques**, donc mécaniques, de fréquence supérieure à la fréquence de coupure de l'oreille humaine, soit environ 15 kHz. La vitesse de propagation d'une onde devient plus élevée lorsque le temps de transmission de l'information d'une particule élémentaire constituant la matière à sa voisine est plus facile. Elle dépend du niveau de cohésion de la matière. Ainsi, les vitesses de propagation d'une onde dans l'air, l'eau ou l'aluminium sont approximativement et respectivement égales à 340 m/s, 1500 m/s et 6000 m/s. Selon la nature du milieu (fluide ou solide), une onde est entièrement décrite par une grandeur scalaire comme la pression ou par une grandeur vectorielle comme le déplacement particulaire. Dans ce dernier cas, l'onde est alors une onde **élastique.** Les ondes ultrasonores se propagent moins bien dans les gaz que les sons audibles, d'autant plus mal que leur fréquence est élevée.

L'onde ultrasonore est une vibration mécanique qui se propage dans un milieu élastique (solide, liquide ou gaz) et dont la fréquence se trouve au-delà des fréquences audibles.

L'onde sonore est une onde mécanique qui nécessite un milieu matériel élastique et déformable pour se propager figure 1.1.

Les corps possèdent une certaine élasticité, ils ont la possibilité de se déformer sous l'action des forces extérieures et reprennent leur forme initiale lorsque celles-ci sont supprimées. Un milieu élastique peut être schématisé grossièrement par des petites masses élémentaires (figurant les particules) réparties régulièrement dans l'espace et reliées par des ressorts (figurant les forces de cohésion de la matière).

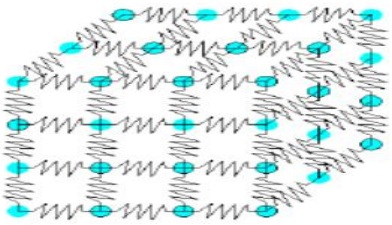

Figure 1.1 : Schématisation d'un milieu élastique

On distingue trois catégories d'ondes acoustiques (figure 1.2).

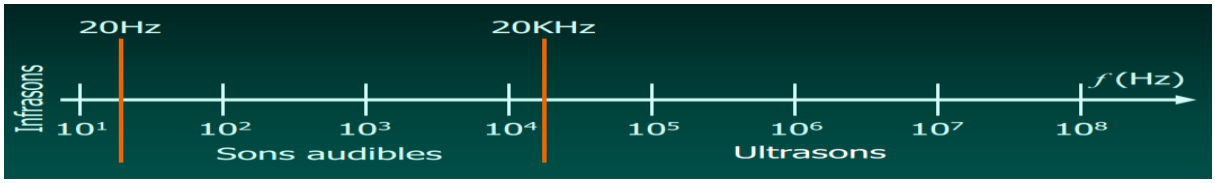

Figure 1.2 : Catégorie d'onde acoustique

1.4.2.3. Caractéristique des ondes acoustiques

Les ondes ultrasonores présentent toutes les propriétés générales des ondes élastiques. Elles n'ont pas de propriété qui leur soit propre. L'importance des ultrasons réside dans le faite que leur longueur d'onde est très petite et qui est souvent du même ordre de grandeur que les dimensions caractéristiques des milieux qu'ils parcourent (diamètre des grains, hétérogénéités, défauts éventuels), ce qui leur permet de traverser facilement les matériaux solides et les fluides (figure 1.3).

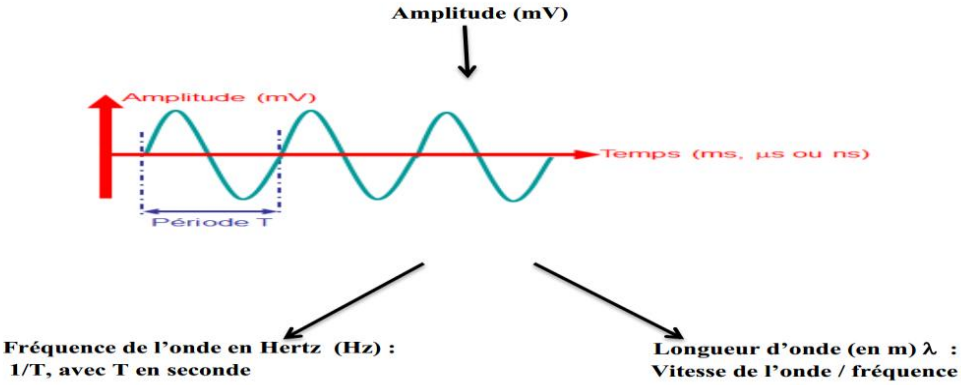

Figure 1.3 : La longueur d'onde λ

1.4.2.4. Différents types d'ondes

Trois types d'ondes mécaniques de propagation (également appelées ondes de contraintes) sont créés lorsque la surface d'un grand milieu élastique solide est perturbée par une charge

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

dynamique ou vibratoire : Les ondes de compression (ondes longitudinales ou P), les ondes de cisaillement (ondes transversales ou S) et les ondes de surface (ondes de Rayleigh).

a- Les ondes longitudinales et transversales :

Les ondes longitudinale (compression P) et transversale (cisaillement S) sont les deux modes de la propagation les plus couramment employés dans l'essai ultrasonique. Ces ondes voyagent dans un solide illimité. Les figures 1.4 et 1.5 illustrent la propagation des ondes longitudinales et de cisaillement respectivement [Corapcioglu et al., 1996].

Une onde ultrasonore est longitudinale ou de compression lorsque la direction de vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde.

La vitesse de l'onde de compression est donnée par ACI Committee 228 1989 comme suit :

$$V = \sqrt{\frac{KE}{\rho}} \qquad (1.1)$$

Où

V : vitesse de l'onde de compression (Km/s)

$$K = \frac{(1-\mu)}{[(1+\mu)(1-2\mu)]} \qquad (1.2)$$

E : module d'élasticité dynamique (GPa)
ρ: densité
μ : rapport dynamique de Poisson ou coefficient de Poisson

La valeur de K varie dans une plage assez étroite. Les variations de E et ρ ont un effet plus significatif sur V que les variations de μ. Pour le béton, V varie généralement de [3000 - 5000 m/s].

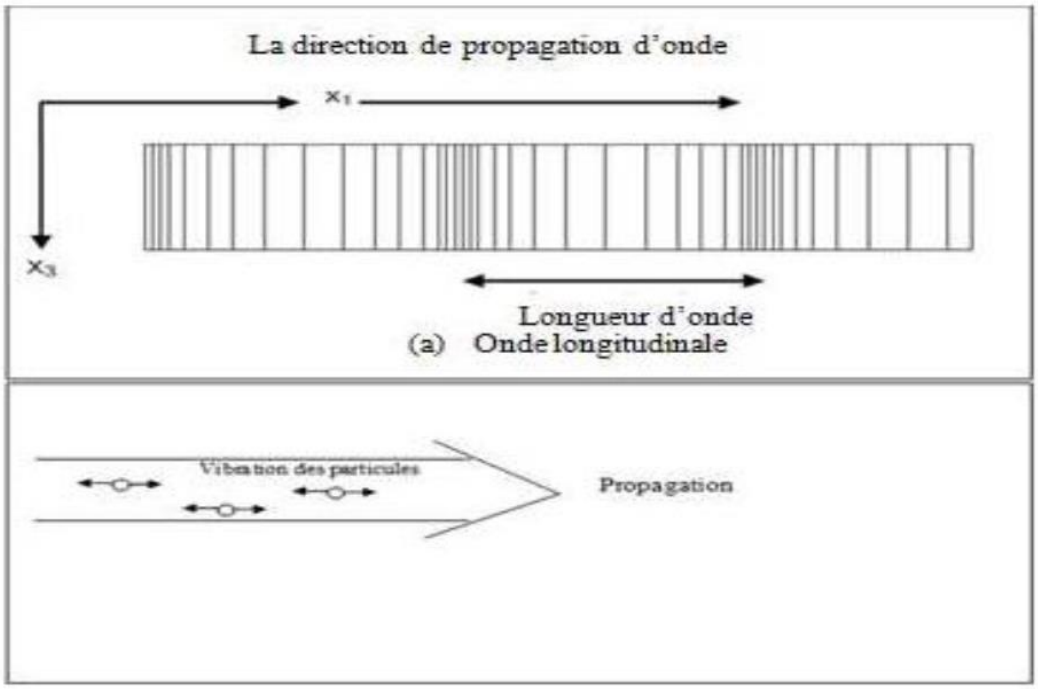

Figure 1.4 : Onde longitudinale [Corapcioglu et al., 1996]

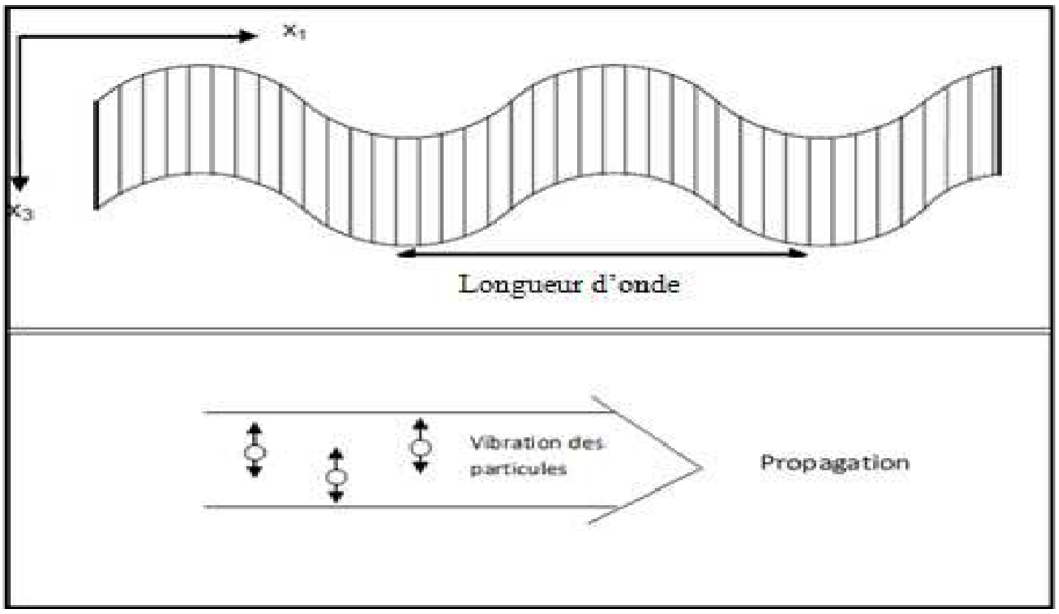

Figure 1.5 : Onde transversale [Corapcioglu et al., 1996]

b- Les ondes de surface

Les ondes de Rayleigh sont des ondes de surface, elles se propagent à la surface des solides pour les quels le mouvement des particules est elliptique (figure 1.6), c'est les ondes les plus utilisées. La schématisation des ondes de surface la plus connue est la formation des rides à la surface d'une étendue d'eau, lorsqu'on jette un caillou.

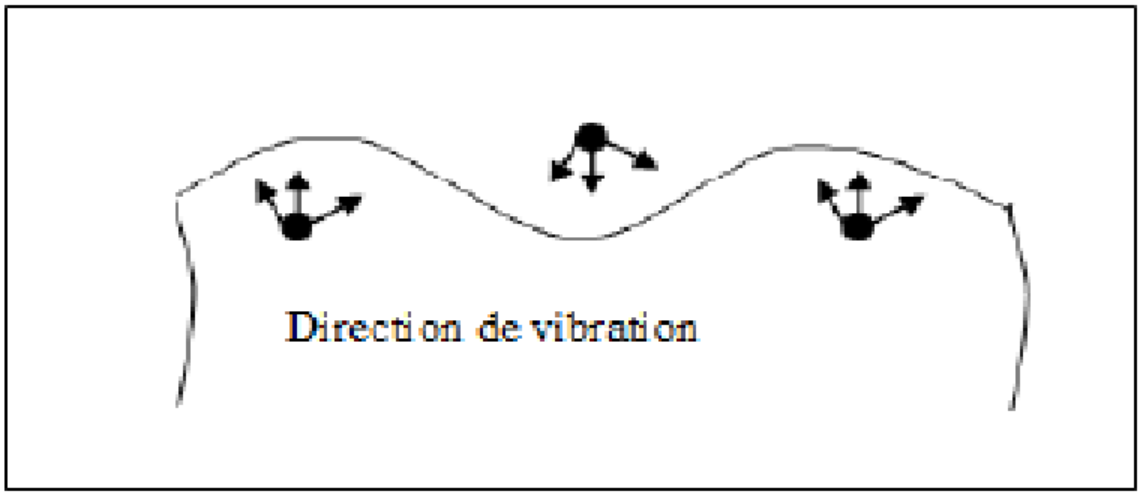

Figure 1.6 : Onde de Rayleigh

1.4.2.5. La production des ultrasons

Actuellement, trois types d'émetteurs sont utilisés pour générer des ultrasons, utilisant la transformation de l'énergie électrique transportée par des courants alternatifs de fréquence élevée en énergie mécanique (oscillations d'un système mécanique).

- **Les générateurs piézoélectriques :** La piézoélectricité a été utilisée par Langevin pour réaliser un générateur d'ultrasons dans lequel l'élément essentiel est constitué par une sorte de mosaïque de lamelles de quartz, d'orientation et d'épaisseur rigoureusement identiques, collées entre deux disques d'acier. L'ensemble est appelé un triplé.

- **Les émetteurs magnétostrictifs :** Ils constituent une application d'une propriété des corps ferromagnétiques qui consiste en une variation des dimensions du corps lorsque celui-ci est placé dans un champ magnétique variable (magnétostriction).

- **Les émetteurs électrostrictifs :** Le fonctionnement de ces émetteurs est proche des émetteurs magnétostrictifs, à la différence que les corps utilisés sont des céramiques placées dans un champ électrique variable.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.4.2.5.1. *Les propriétés des ultrasons*

La possibilité de produire des ultrasons de fréquence et de puissance toujours plus grande a permis de mettre en évidence des propriétés spécifiques aux ondes ultrasonores.
La technique de la vitesse d'impulsion d'ultrason (UPV) parmi les techniques de l'auscultation sonique est l'un des moyens qui permet de contrôler et d'évaluer cette évolution au courant de temps. Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Par ailleurs, en utilisant un instrument ultrasonore tel que «PunditLab», la détermination et l'estimation de la résistance est plus facile et très rapide par rapport à la méthode destructive. En outre, si on arrive à trouver une relation entre ces deux types de caractéristiques, on aurait gagné en temps et en matière lors de la conception ou

du contrôle ou de l'entretient des structures. C'est cette technique qui sera utilisée dans notre travail expérimental.

1.4.2.5.2. *La vitesse d'impulsion d'ultrason (UPV)*

a- Principe de l'essai

Le principe de mesure de la vitesse suit plusieurs étapes afin d'arriver au calcule de cette vitesse de propagation des ondes longitudinales ou de compression, qui sont les ondes élastiques les plus rapides. Tout d'abord, le générateur d'impulsion envoie une impulsion électrique d'une certaine fréquence qui correspond à la fréquence centrale du capteur piézoélectrique. Ce capteur piézoélectrique servant d'émetteur transforme l'impulsion en vibration mécanique. Celle-ci se propage dans l'échantillon investigué jusqu'à l'autre capteur servant de récepteur. Le récepteur détecte l'onde et la transforme en signal électrique. Ce signal est amplifié et transmis au circuit de mesure du temps. Ce dernier détermine alors la durée de propagation dans l'échantillon. Puis, l'unité d'affichage donne la durée de propagation. Connaissant la longueur parcourue par le signal, on détermine ainsi la vitesse. La méthode des vitesses ultrasonores est un essai qui est normalisé par [ASTM C597 – 09, 2003]. La figure 1.7 présente le schéma récapitulatif de cette méthode. La gamme de fréquence typiquement utilisée pour le béton est de 20 kHz à 300 kHz.

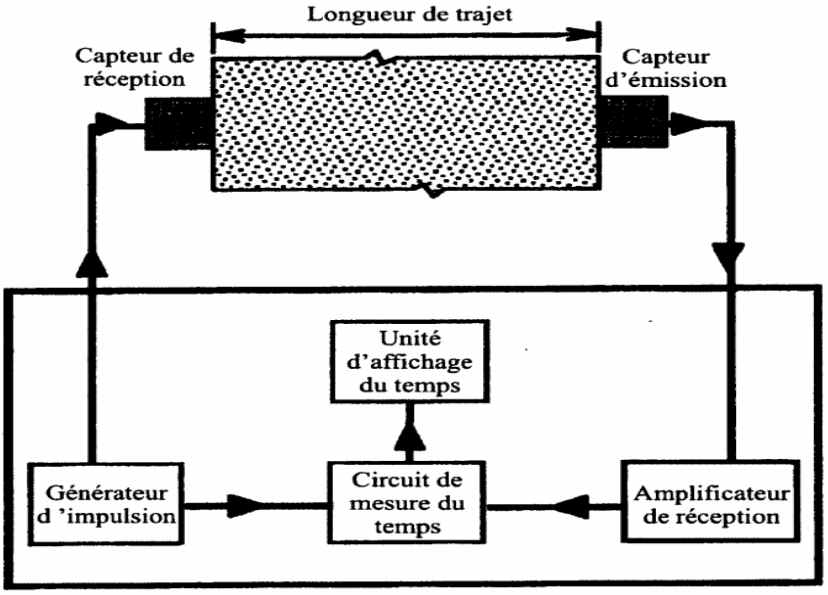

Figure 1.7 : Schéma de la méthode de vitesse ultrasonore

La vitesse d'impulsion de l'onde de compression V est donnée par la relation suivante :

$$V = \frac{L}{\Delta t} \qquad (1.3)$$

Où

V : vitesse d'impulsion d'ultrason (m/sec)
L : distance (m)
Δt : variation du temps (sec)

L'impulsion de compression transmise par le béton subit une diffusion à diverses limites d'agrégats-mortier. Au moment où l'impulsion atteint le transducteur de réception, elle se transforme en forme d'onde complexe (des ondes de compression et de cisaillement à réflexion multiple). Bien sûr, les ondes de compression se déplacent plus vite et arrivent au récepteur.

b- Méthodologie

Des préparations de base sont communes à chaque test. La distance (longueur de trajet) entre les transducteurs doit être mesurée aussi précisément que possible (sauf en cas de mesure en mode «Temps de transmission»).
Dans tous les tests d'impulsion ultrasonique, il est primordial d'utiliser une forme de couplant entre les faces des transducteurs et le matériau testé, sinon, une perte du signal due à un couplage acoustique inadéquat se produit. Le couplant ultrasonique fourni assure un bon couplage lorsqu'il est utilisé sur du béton ou sur d'autres matériaux présentant des surfaces lisses. De la graisse de silicone, de la graisse de roulement intermédiaire ou du savon liquide peut également être utilisé pour obtenir un résultat satisfaisant. Pour les surfaces plus rugueuses, une graisse épaisse ou de la gelée de pétrole est recommandée. Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de préparer la surface en la lissant. Si cela est impossible, il faut envisager l'utilisation de transducteurs exponentiels

c- Type de Mesure

Trois types de dispositions des transducteurs sont couramment utilisés :

Transmission directe : Il s'agit de la méthode la plus précise pour déterminer la vitesse d'impulsion. La longueur du trajet est mesurée entre chaque centre des transducteurs (figure 1.8).

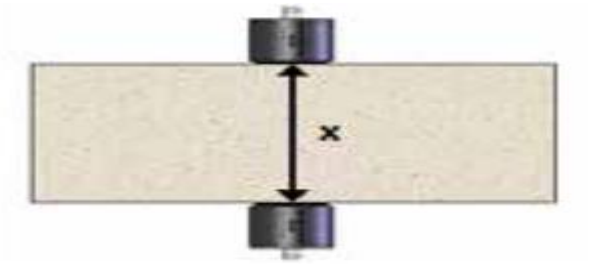

Figure 1.8 : Transmission directe

Transmission indirecte : L'amplitude du signal représente environ 3% de l'amplitude du signal par rapport à la transmission directe. La longueur du trajet peut être incertaine (figure 1.9). Cette méthode est utilisée pour déterminer la fissure et sa profondeur, elle est efficace pour caractériser les fissures de surface. La profondeur d'une fissure de surface remplie d'air peut

être estimée par la méthode de la vitesse d'impulsion comme le montre la figure 1.10. La profondeur h est donnée par l'équation 1.4.

Figure 1.9 : Transmission indirecte

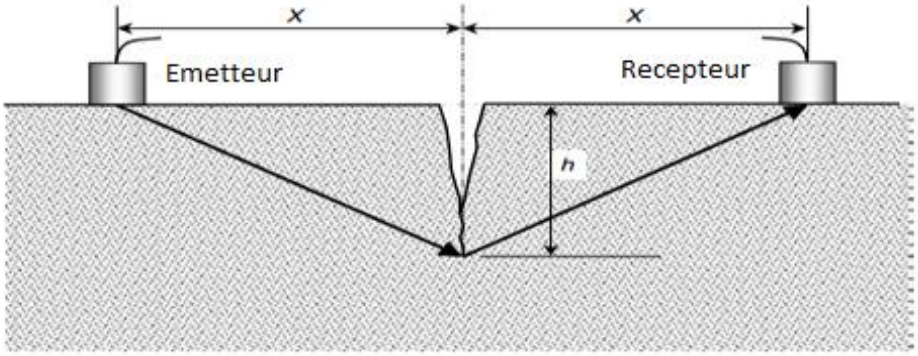

Figure 1.10 : Schéma pour la mesure de la profondeur de fissure de surface h

$$h = \frac{X}{T_2}\sqrt{T_1^2 - T_2^2} \qquad (1.4)$$

Où

X : distance au transducteur de la fissure (m)

T_1 : temps de transit autour de la fissure (s)

T_2 : temps de transit le long de la surface du même type de béton sans fissure (s), (il est à noter que la longueur du chemin de surface pour T_1 et T_2 doit être égale)

Transmission semi-directe : La sensibilité se situe entre les deux autres méthodes. La longueur du trajet est mesurée entre chaque centre des transducteurs (figure 1.11).

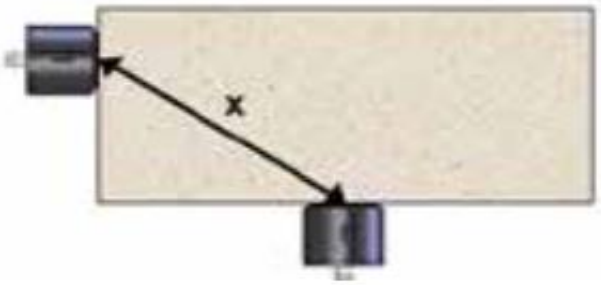

Figure 1.11 : Transmission semi-directe

d- Analyse de l'amplitude

L'analyse d'amplitude est une méthode développée à l'Université de Tonji à Shanghai et est largement utilisée dans toute la Chine pour les tests de comparaison du béton dans des structures. Afin d'enregistrer l'amplitude, le marqueur d'analyse d'amplitude doit être réglé dans le menu Paramètres. Une fois ce paramètre défini, l'amplitude est enregistrée dans le résultat du test avec le temps de transmission (figure 1.12).

Figure 1.12 : Béton de référence de qualité acceptable

Une mesure de référence est effectuée sur une section de béton de qualité connue.

t_0 : temps de transmission de référence
A_0 : niveau de réception de référence

Les mesures suivantes sur la structure sont comparées à ces deux valeurs et une inférence sur la qualité du béton est réalisée en fonction de ces éléments.

Six cas différents sont identifiés et permettent à l'utilisateur d'émettre un jugement sur la qualité du béton (figures 1.13-1.18).

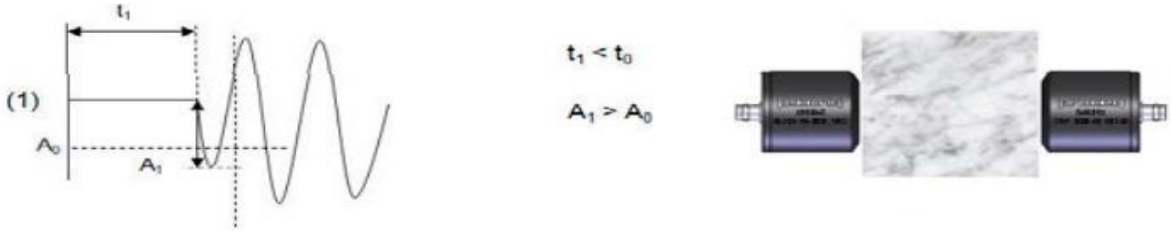

Figure 1.13 : Bonne qualité – Haute résistance

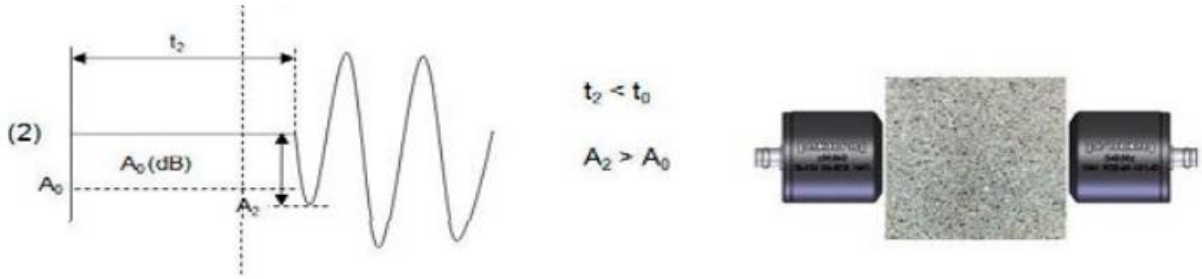

Figure 1.14 : Haute teneur en granulats fins. Faible teneur en granulats grossiers

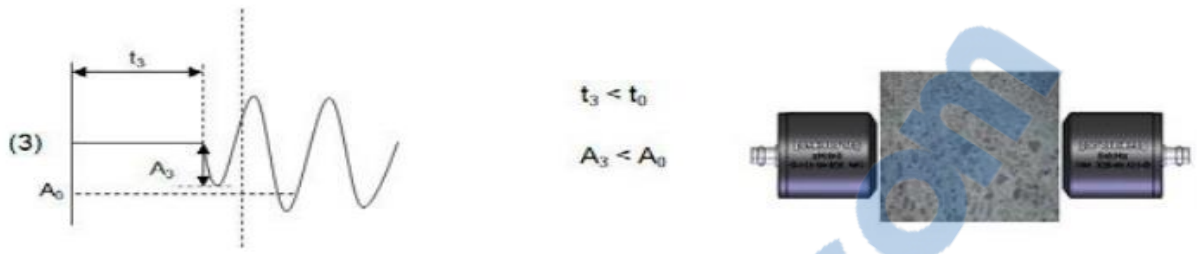

Figure 1.15 : Haute teneur en granulats grossiers. Faible teneur en granulats fins

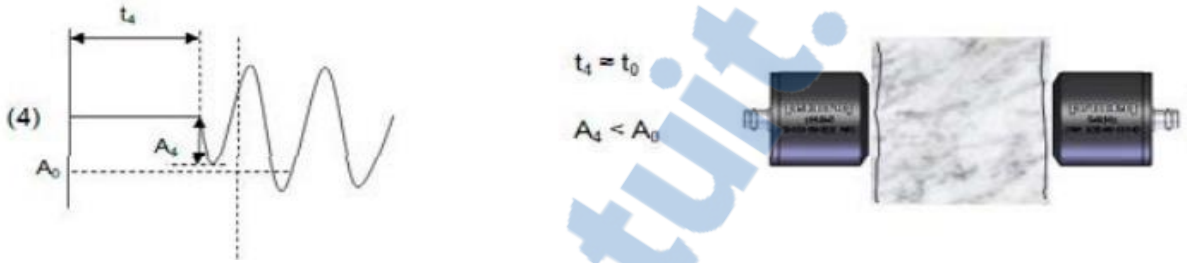

Figure 1.16 : Défaut à la surface. Couplage médiocre

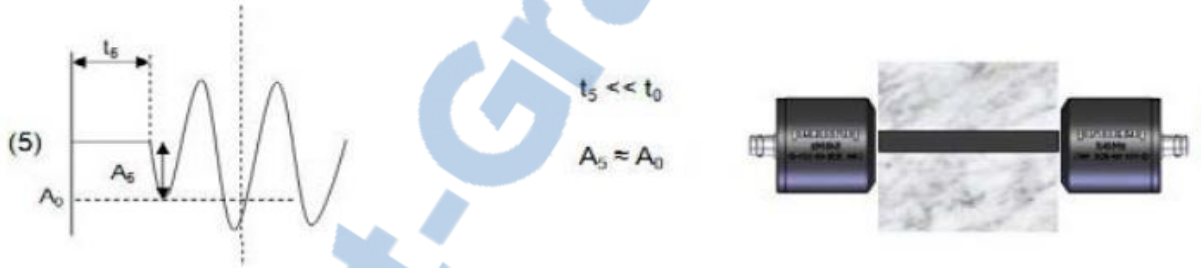

Figure 1.17 : Mesure à travers l'armature métallique

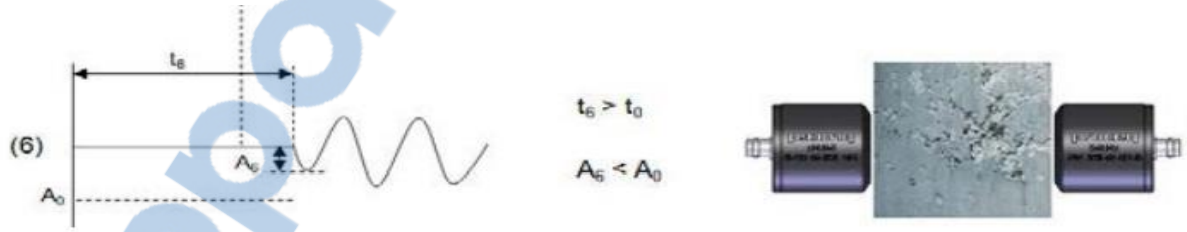

Figure 1.18 : Défauts, nids, vides

Lorsque cette méthode de surface est utilisée, l'impulsion se propage dans la couche du béton près de la surface. Le béton près de la surface est parfois d'une composition légèrement différente du béton dans la couche inférieure. Par exemple, le béton près de la surface d'une dalle présente des quantités plus élevées de matériaux fins que le béton dans la partie inférieure de la dalle. Ainsi, les vitesses mesurées par la méthode de transmission de surface sont généralement inférieures à celles mesurées par transmission directe. Ce comportement, cependant, peut être transformé en un moyen de détecter et d'estimer l'épaisseur d'une couche de matériaux de qualité différente. Une couche de béton de qualité inférieure peut se produire en raison de pratiques de construction inappropriées (mauvaises vibrations et finitions, mauvais durcissement, joints froids en raison d'un retard, placement incorrect), des dommages causés

Rapport-Gratuit.com

par des intempéries (congélation et décongélation, attaque de sulfate et corrosion des armatures et d'autres éléments intégrés) et des dégâts causés par le feu. L'épaisseur de la couche peut être estimée en utilisant la procédure de transmission de surface.... Lorsque les deux transducteurs sont plus rapprochés, le chemin de déplacement le plus rapide est à travers la couche supérieure du béton, et lorsque les transducteurs sont déplacés plus loin, le chemin de déplacement le plus rapide est le chemin combiné entre les deux couches. La vitesse de l'impulsion à travers la couche supérieure (V_1) et la couche inférieure (V_2) (équation 1.5) sera indiquée sur le tracé par les différentes pentes des deux lignes droites ajustées aux données (figure 1.19).

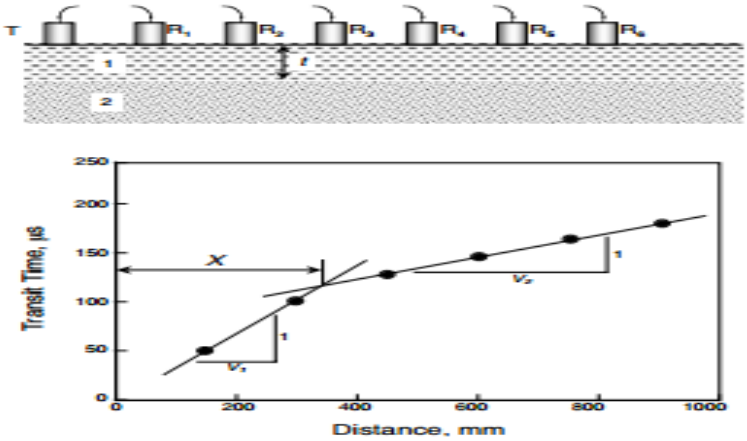

Figure 1.19 : Utilisation de la méthode de surface pour déterminer la profondeur de détérioration t

$$t = \frac{X}{2}\sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \qquad (1.5)$$

Cette méthode convient uniquement lorsque la couche supérieure (la couche de mauvaise qualité) est distincte, présente une épaisseur raisonnablement uniforme et $V_2 > V_1$. Benedetti a proposé un modèle plus réaliste pour l'interprétation des mesures de la vitesse de surface, qui suppose une répartition linéaire du module d'élasticité dans une couche endommagée [Benedetti, 1998].

e- Estimation de la Résistance du béton

La méthode de la vitesse d'impulsion peut fournir un moyen d'estimer la résistance du béton in situ, bien qu'il n'y ait pas une relation physique entre la résistance et la vitesse. La résistance du béton peut être estimée à partir de la vitesse de l'impulsion par une corrélation graphique préétablie entre les deux paramètres. La relation entre la résistance et la vitesse de l'impulsion n'est pas unique et est affectée par de nombreux facteurs.

f- Facteurs affectant la vitesse des impulsions

Les facteurs affectant la vitesse de l'impulsion peuvent être divisés en deux catégories : (a) facteurs résultant directement des propriétés du béton ; (b) d'autres facteurs. Ces facteurs d'influence sont :

➢ **Effets des propriétés du béton**

- **Taille, granulométrie, type et quantité d'agrégats**

De nombreux chercheurs ont constaté que la vitesse de l'impulsion est affectée de manière significative par le type et la quantité d'agrégats. [Jones 1962 ; Bullock 1959 et Kaplan 1959] ont rapporté que, pour le même mélange de béton et au même niveau de résistance à la compression, le béton avec le gravier arrondis avait la vitesse d'impulsion la plus basse, le calcaire écrasé a entraîné la vitesse d'impulsion la plus élevée. La figure 1.20 montre que, pour une valeur donnée de la vitesse de l'impulsion, plus le rapport agrégat-ciment est élevé, plus la résistance de compression est faible [Jones, 1969].

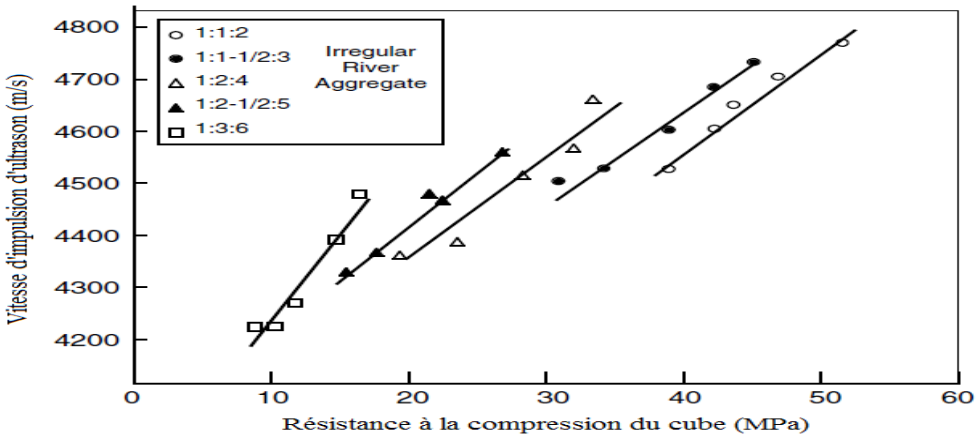

Figure 1.20 : Effet des agrégats fin : proportions agrégées grossières sur la relation entre la vitesse de l'impulsion et la résistance à la compression [Jones, 1969]

- **Type de ciment**

[Jones, 1962] a montré que le type de ciment n'a pas eu d'effet significatif sur la vitesse de l'impulsion. Le taux d'hydratation, cependant, est différent pour différents ciments et influencera la vitesse de l'impulsion. À mesure que le degré d'hydratation augmente, le module d'élasticité augmentera et la vitesse d'impulsion augmentera également.

- **Ratio eau-ciment**

[Kaplan 1959] a étudié l'effet du rapport eau-ciment (E/C) sur la vitesse de l'impulsion. Il a montré que lorsque le rapport E/C augmente, les forces de compression et de flexion et la vitesse de l'impulsion correspondante diminuent en supposant qu'il n'y a eu aucun changement dans la composition du béton.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- **Additions**

L'entrainement de l'air ne semble pas influencer la relation entre la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression du béton [Jones, 1954]. D'autres mélanges influenceront la vitesse de l'impulsion de la même manière qu'ils influenceraient le taux d'hydratation. Par exemple, l'ajout de chlorure de calcium réduira le temps de prise du béton et augmentera le taux d'augmentation de la vitesse d'impulsion.

- **Age du béton**

L'effet de l'âge du béton sur la vitesse de l'impulsion est similaire à celui sur le développement de la résistance du béton. [Jones, 1954] a signalé la relation entre la vitesse d'impulsion et l'âge. Il a montré que la vitesse augmente très rapidement d'abord, mais bientôt s'effondre. Cette tendance est similaire à la résistance par rapport à la courbe d'âge pour un type particulier de béton, mais la vitesse de l'impulsion atteint une valeur limite plus tôt que la résistance. Il a en outre conclu que, une fois que la courbe de vitesse de l'impulsion s'allonge, les erreurs expérimentales rendent impossible l'estimation de la résistance avec précision.

- **Température du béton**

Il a été constaté que les variations de température entre 5 et 30 ° C ont un effet insignifiant sur la vitesse de l'impulsion [Jones et al., 1969] et [BS 1881, 1986].

- **Conditions d'humidité et de durcissement du béton**

La vitesse de l'impulsion pour le béton saturé est plus élevée que celle pour le béton à l'air sec. L'humidité a généralement moins d'influence sur la vitesse du béton à haute résistance que sur le béton à faible résistance en raison de la différence de porosité [BS 1881,1986]. Kaplan (1958) a constaté que la vitesse de propagation des impulsions pour les échantillons polymérisés en laboratoire était supérieure à celle des échantillons polymérisés sur site.

➢ **Autres effets**

- **Contact du transducteur**

Si un soin suffisant n'est pas pris en compte pour obtenir un bon contact du transducteur (par exemple, une pression incohérente appliquée aux transducteurs), une lecture incorrecte, de la vitesse de l'impulsion peut en résulter.

- **Longueur du chemin (distance entre les transducteurs)**

Dans la pratique, les longueurs de chemin plus petites tendent à donner une vitesse plus variable et légèrement plus élevée en raison de la nature inhomogène du béton [Jones, 1962]. [RILEM, 1972] a recommandé les longueurs de chemin minimales suivantes :

1. 100 mm pour le béton ayant une taille maximale d'agrégats de 30 mm
2. 150 mm pour le béton ayant une taille maximale d'agrégats de 45 mm

- **Taille et forme d'un échantillon**

Dans la plupart des cas, la vitesse de l'impulsion ne dépend pas de la taille et de la forme d'un spécimen. Cette exigence est facilement satisfaite pour un échantillon de test de dimension finie en exigeant que la plus petite dimension latérale de l'échantillon soit supérieure à la longueur d'onde de l'impulsion. Pour de telles situations, il serait conseillé d'utiliser un transducteur à fréquence plus élevée, réduisant ainsi la longueur d'onde et l'exigence de dimension latérale la moins importante. L'agrégat de taille maximale devrait également être inférieur à la longueur d'onde ; Sinon, l'énergie de l'onde s'atténuera au point qu'aucun signal clair ne peut être détecté sur le transducteur de réception, c'est les recommandations citées par [RILEM, 1972].

- **Niveau de contrainte**

La vitesse de l'impulsion n'est généralement pas affectée par le niveau de compression dans l'élément testé. Cependant, lorsque le béton est soumis à un niveau très élevé de contraintes statiques ou répétées, par exemple, 65% de la contrainte ultime ou supérieure, les microfissures se développent dans le béton, ce qui réduira considérablement la vitesse de l'impulsion [Popovics et al., 1991] et [Wu et al., 1998].

1.4.2.5.3. Avantages et limites

La méthode de la vitesse d'impulsion est un excellent moyen pour étudier l'uniformité du béton. La procédure d'essai est simple et l'équipement est disponible sur le marché et est facile à utiliser en laboratoire ainsi que sur le terrain.

- Les procédures d'essai ont été normalisées par l'ASTM et d'autres organisations. Avec la disponibilité de petits instruments portables numériques, relativement peu coûteux et faciles à utiliser, les tests par ultrasons ajoutent une nouvelle dimension au contrôle de la qualité du béton dans le domaine.
- Des tests de vitesse d'impulsion ultrasonore peuvent être effectués à la fois sur des éprouvettes de laboratoire et des structures en béton, un moyen efficace de délimiter les fissures de surface et interne dans les structures en béton, améliore l'utilité de ces tests.
- Dans la mesure où un grand nombre de variables affectent les relations entre les paramètres de résistance du béton et sa vitesse d'impulsion, l'utilisation de ce dernier pour estimer les résistances de compression et/ou de flexion du béton n'est pas recommandée, à moins que des tests de corrélation antérieurs n'aient été effectués.

1.4.3. Méthode de la fréquence de résonance

C'est une méthode non destructive qui a été développée premièrement en 1938 par [Powers, 1938] aux États Unis. [Hornibrook, 1939] a raffiné la méthode en utilisant des équipements électroniques pour mesurer la fréquence de résonance. D'autres recherches antérieures sur le développement de cette méthode incluent celles de [Thomson, 1940 ; Obert, 1941 et Stanton, 1944]. La fréquence de résonance a été mesurée avec précision à partir de l'échelle graduée de l'oscillateur audio de conduite variable (Malhotra et al., 2004). L'équipement est généralement

connu comme un sonomètre, et l'équipement a été utilisé pour mesurer divers modules dynamiques du béton [Jones, 1957] (figure 1.21). La méthode de la fréquence de résonance est décrite dans la norme [ASTM C 215-02].

L'appareil d'essai se compose principalement de deux sections, l'une génère des vibrations mécaniques et l'autre détecte ces vibrations.

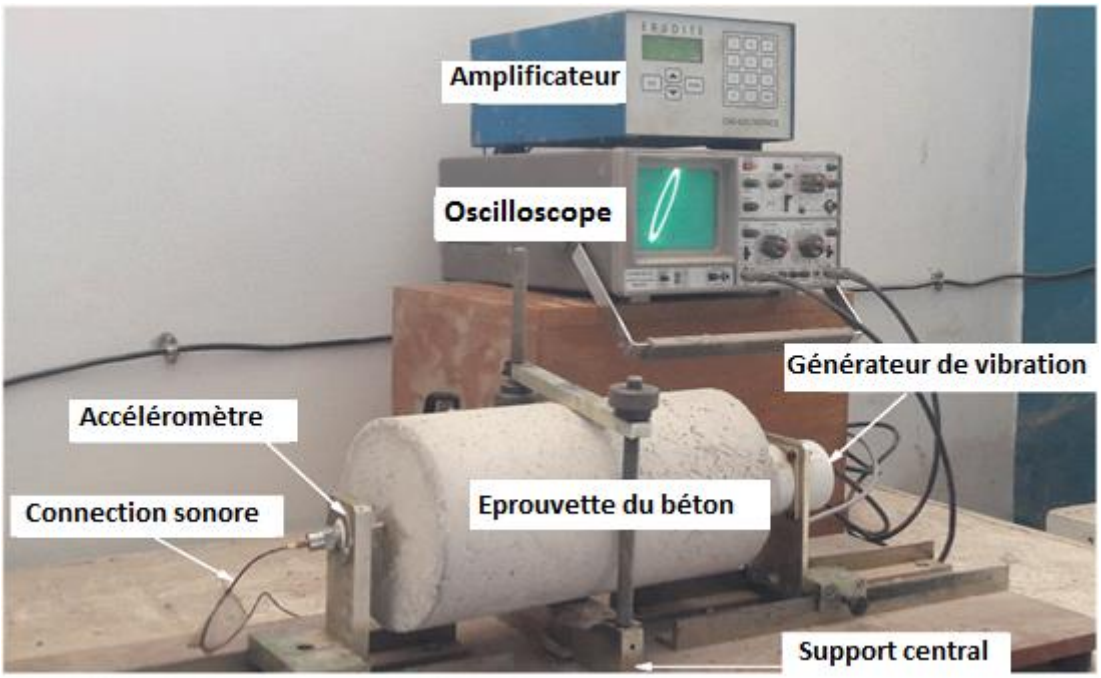

Figure 1.21 : L'appareil ERUDITE

1.4.3.1. Principe de mesure

a- **Mode manuel**

Utilisation de ce mode pour déterminer quels voltages et gammes de fréquences pour l'ERUDIT qui doivent être adapté à un type particulier d'échantillon à tester.

b- **Mode automatique**

Le but de ce mode est de déterminer la fréquence de résonance de l'échantillon du béton. Cette mesure est faite automatiquement, et ce n'est qu'une gamme de fréquence qu'il souhaite balayer, le pas entre deux fréquences ainsi que le voltage appliqué par l'appareil.

1.4.3.2. Procédure de contrôle

Cet appareil Erudit nous permet de mesurer la fréquence de résonance fondamentale d'une éprouvette en béton durci (essai non destructif).

Nous avons déterminé la fréquence de résonance des éprouvettes selon la norme NF P18-414[AFNOR 2002]. La procédure d'essai consiste initialement à placer un émetteur électro-acoustique à l'une des extrémités de l'éprouvette et un générateur électrodynamique de basse fréquence pour produire des fréquences d'excitation. Les courants alternatifs, fournis par le générateur, sont transformés en vibrations mécaniques par l'émetteur. Cette excitation ou

vibration peut être appliquée en mode longitudinal, transversal ou torsionnel et sont notées respectivement F_L, F_F *et* F_T, elles permettront de calculer par la suite les grandeurs suivantes : le module d'élasticité dynamique E_d pour les différents modes (longitudinal, flexionnel), Le module de rigidité G_d (mode torsionel) et Le coefficient de Poisson µ.

1.4.3.3. Vibrations longitudinales

Les vibrations longitudinales sont produites quand la direction de vibration est parallèle à l'axe longitudinal de l'éprouvette. Pour cela, les transducteurs acoustiques doivent être placés selon le schéma de la figure 1.22. Pour un prisme, le mode fondamental d'oscillation implique un nœud au milieu (figure 1.23) et des ventres aux extrémités selon l'équation 1.6. II en résulte :

$$\lambda = 2L \qquad (1.6)$$

Où :

λ: longueur d'onde (m)

L : longueur de l'éprouvette étudiée (m)

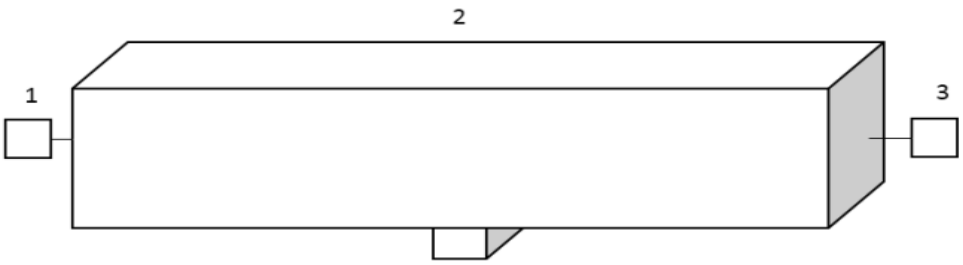

Figure 1.22 : Positionnement des transducteurs pour une vibration longitudinale
1 : émetteur ; 2 : éprouvette ; 3 : récepteur

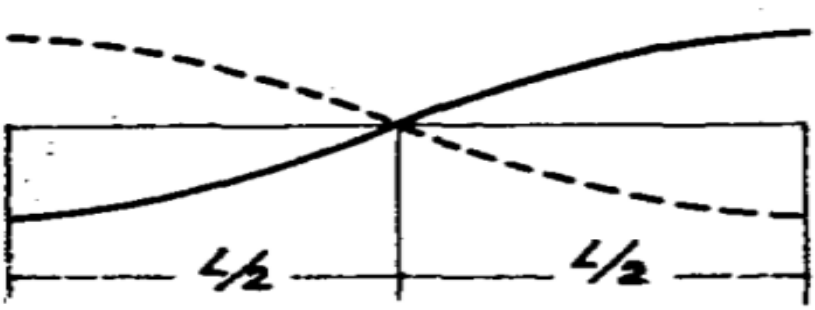

Figure 1.23 : Mode fondamental pour une vibration longitudinale

Mode opératoire :

- Centrer l'éprouvette sur le support central et la maintenir à l'aide de la traverse.
- Graissage légèrement des parties du vibreur et du capteur en contact avec l'éprouvette à tester.
- Le capteur et le vibreur doivent être positionnés de telle sorte qu'ils soient en contact avec le milieu de chaque extrémité de l'éprouvette puis les fixer.
- La sélection de la gamme de fréquence désirée (type d'éprouvette), dans notre cas il s'agit d'éprouvettes cylindriques 16x32 cm^2, donc nous choisirons la gamme de fréquences entre 5000 et 7000 Hz comme indiqué dans le manuel d'utilisation et par conséquent dans la norme.
- Connecter l'accéléromètre « SENSOR » et le vibreur « DRIVER » à l'arrière du boitier de l'appareil.
- On sélectionne le mode manuel (« 1 ») ou automatique (« 2 ») à partir du menu principal.

1.4.3.4. Vibrations de flexion

Les vibrations de flexion se produisent quand l'éprouvette est soumise à des charges de flexion variant alternativement. Dans le cas des vibrations de flexion, des modifications de dimensions et de forme se produisent dans les éléments de masse de l'éprouvette.

L'excitation est produite dans un plan perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'échantillon [Bordas, 1983] (figure 1.24). Pour le mode fondamental, le nœud de vibration apparaît à 0,224 L des extrémités de la poutre (figure 1.25). La forme de la courbe de résonance, aux environs de son pic, est donnée, pour un exemple, dans la figure 1.26.

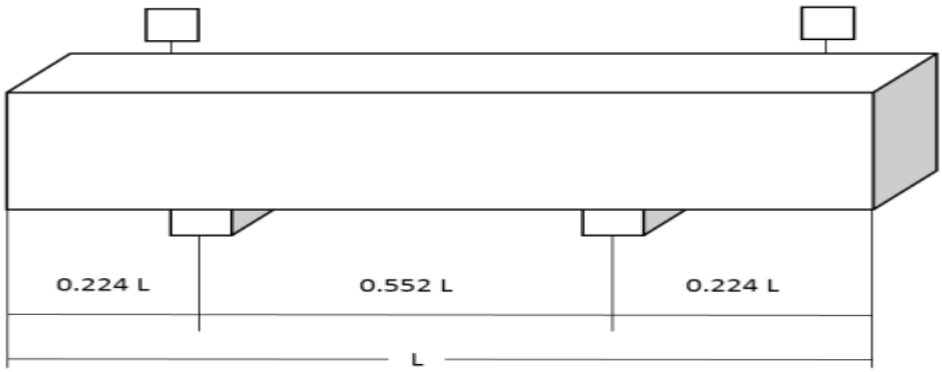

Figure 1.24 : Position des transducteurs pour une mesure de vibration de flexion [Bordas, 1983]

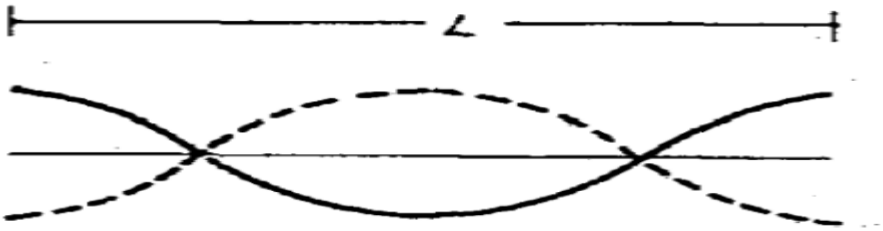

Figure 1.25 : Mode fondamental pour une vibration de flexion avec les nœuds à 0,224L des extrémités

Mode opératoire :

Les mêmes étapes et procédures à suivre que ceux des vibrations longitudinales

. Sauf que, la gamme de fréquence devient 3000/4200 Hz comme indiqué dans le manuel d'utilisation et la norme.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

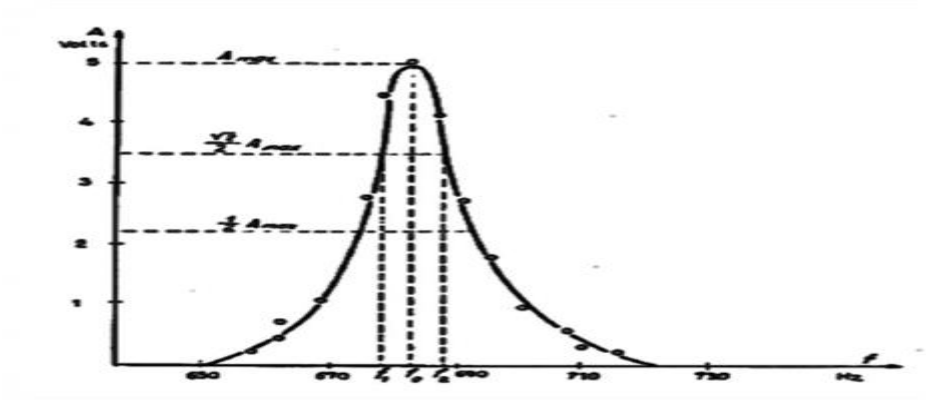

Figure 1.26 : Relation entre amplitude de fréquence pour une poutre de béton à proximité de la résonance [Bordas, 1983].

1.4.3.5. Vibrations de torsion

Les vibrations de torsion se produisent quand une éprouvette est soumise à un couple alternatif. Dans ce cas, les déplacements se produisant dans les éléments de masse de l'éprouvette, sont fonction du module de cisaillement. Les vibrations de torsion sont excitées en effectuant le couplage selon le schéma de la figure 1.27.

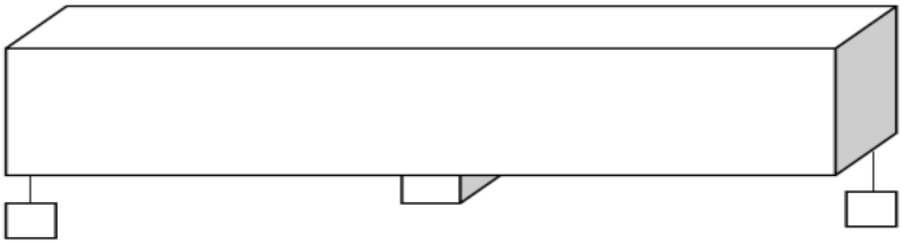

Figure 1.27 : Position des transducteurs pour une mesure de vibration de torsion

1.4.3.6. Détermination des constantes dynamiques

1.4.3.6.1. Mesures

Nous varions la fréquence d'excitation jusqu'à ce que la mesure de la tension de sortie indique une valeur maximale et ce si après couplage des transducteurs acoustiques (émetteur et récepteur). Le résultat est un maximum unique voir figure 1.21.

1.4.3.6.2. Module d'élasticité dynamique par vibrations longitudinales

La disposition de l'émetteur et du récepteur nous donne la possibilité de supposer qu'on a un déplacement virtuel longitudinal parallèle à l'axe principal de l'éprouvette comme le montre la figure 1.28.

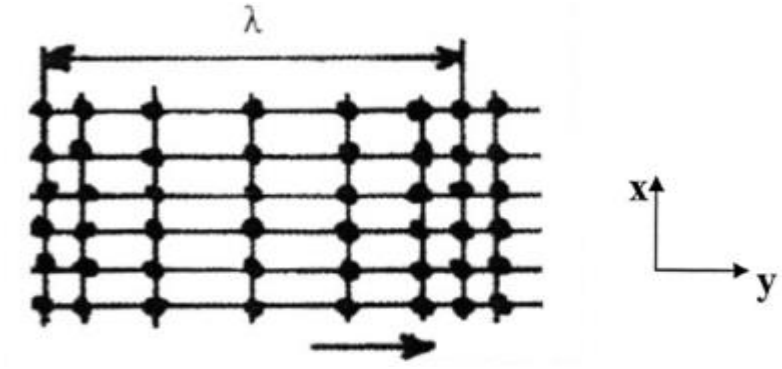

Figure 1.28 : Propagation des ondes longitudinales

Dans un milieu élastique et continu, l'équation de mouvement dynamique s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \rho . F_x = \rho \ddot{U}_x \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \rho . F_y = \rho \ddot{U}_y \end{cases} \quad (1.7)$$

Où :

ρ: désigne la masse volumique du corps soumis à la vibration (kg/m^3)

$\ddot{U}$: l'accélération suivant l'axe (oy) (m/s²)

Fy : densité de force volumique dans la direction (*oy*), qui est nulle.

Cette densité qui est nulle et sous l'effet de la propagation des ondes longitudinales seul le déplacement virtuel *U*y qui dépend seulement de *y* est considéré comme non nul ; par conséquent une seule composante du tenseur des déformations est également non nulle.

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \rho \ddot{U}_y \end{cases} \quad (1.8)$$

Par ailleurs, l'éprouvette est régie par la loi de Hooke comme suit:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x => E\left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) = 0 \; ou \; \varepsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x} \quad (1.9)$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} => G\left(\frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) = 0 \; dont \; \gamma_{xy} = \left(\frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \quad (1.10)$$

Ce qui nous donne par la suite l'équation (1.11)

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \rho \ddot{U}y \quad (1.11)$$

En outre, on sait que :

$$\sigma_y = E\varepsilon_y \quad (1.12)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial U_y}{\partial y} \quad (1.13)$$

Où

ε_y: déformation longitudinale suivant l'axe (oy).

Donc en remplaçant la relation (1.13) dans (1.12), on obtient :

$$\sigma_y = E\frac{\partial U_y}{\partial y} \quad (1.14)$$

En substituant l'équation (1.14) dans l'équation (1.11), on obtient:

$$\ddot{U}_y - \frac{E}{\rho}\frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} = 0 \quad (1.15)$$

Où le ratio $\frac{E}{\rho}$ désigne le carré de la vitesse Vp des ondes longitudinales :

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{(Cas de résonance)} \quad (1.16)$$

On remplace (1.16) dans (1.15) on trouve :

$$\ddot{U}y - V^2{}_p U''{}_y = 0 \quad (1.17)$$

L'équation (1.17) est une équation aux dérivées partielles du second ordre à coefficients constants V_p. En plus, cette vitesse peut être calculé par $V_p = \frac{2L}{T}$ $avec\ T = 1/F_{rl}$.

Où

L : longueur de l'éprouvette en m

T : période fondamentale (seconde), dont T =2t

t : temps de propagation de l'onde de l'émetteur vers le récepteur

F_{rl} : fréquence de résonance en Hz.

Ce qui nous donne la possibilité d'écrire :

$$V_p = 2LF_{rl} \ (cas\ de\ résonance) \qquad (1.18)$$

On remplace (1.18) dans (1.16), on obtient le module d'élasticité dynamique E_d (GPa) suivant:

$$E_d = 4 * L^2 (F_{rl})^2 \rho * 10^{-12} \qquad (1.19)$$

1.4.3.6.3. Module de cisaillement

La disposition latérale de l'émetteur et du récepteur (figure 1.29) engendre un déplacement virtuel perpendiculaire à l'axe principal de l'éprouvette comme c'est mentionné sur la figure 1.30.

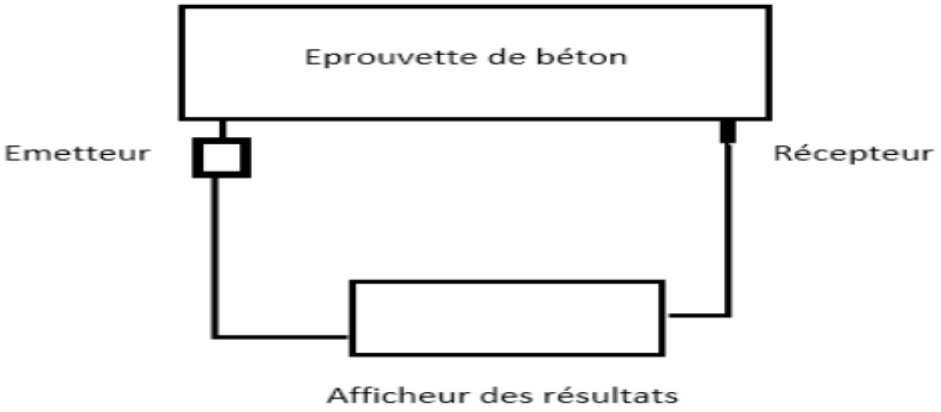

Figure 1.29 : Schéma de l'appareil fonctionnant par vibration mécanique torsionnelle

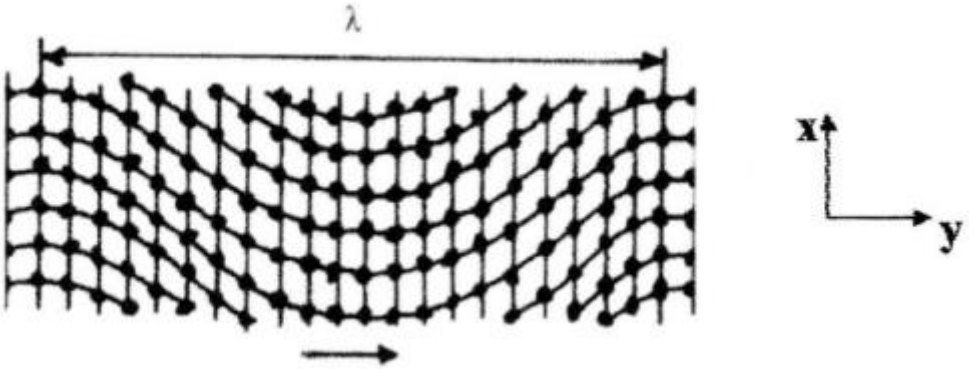

Figure 1.30 : Propagation des ondes de cisaillement

De la même manière que pour le module d'élasticité longitudinale, sous l'effet de la propagation des ondes seul le déplacement virtuel U_x qui dépend seulement de x est considéré comme non nul ; par conséquent une seule composante du tenseur des déformations est également non nulle, ce qui nous ramène à écrire :

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial_x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial_y} = \rho \ddot{U}_x \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial_x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial_y} = 0 \end{cases} \qquad (1.20)$$

Où (1.20) représente les deux équations d'équilibre de contraintes.

$\sigma_x = E\varepsilon_x => E\frac{\partial U_x}{\partial x} = 0$ et $\sigma_y = E\varepsilon_y => E\frac{\partial U_y}{\partial y} = 0$

Donc (1.20) s'écrit :

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \rho \ddot{U}_x \qquad (1.21)$$

Avec τ_{xy} : contrainte tangentielle de cisaillement.

Par ailleurs, on sait que :

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \qquad (1.22)$$

Où τ_{xy} désigne la distorsion et G désigne le module de cisaillement.

Ce déplacement angulaire est sous la forme :

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \qquad (1.23)$$

On remplace (1.23) dans (1.22), on obtient :

$$\tau_{xy} = G\left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) \qquad (1.24)$$

Or U_y est nul, donc :

$$\tau_{xy} = G\frac{\partial U_x}{\partial y} \qquad (1.25)$$

En remplaçant l'équation (1.25) dans (1.21), on peut écrire :

$$G\frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} = \rho \ddot{U}_x \qquad (1.26)$$

Réarrangeons l'équation (1.26) pour écrire :

$$\ddot{U}_x - \frac{G}{\rho}\frac{\partial^2 U_x}{\rho \partial y^2} = 0 \qquad (1.27)$$

Le ratio $\frac{G}{\rho}$ désigne le carré de la vitesse V_s des ondes de cisaillement définit par : $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ dans le cas de la résonance on peut écrire :

$$V_s = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} \qquad (1.28)$$

On remplace (1.28) dans (1.27) et l'on obtient :

$$\ddot{U}_x - V_s^2 U''_x = 0 \qquad (1.29)$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Où (1.29) est l'équation du mouvement dynamique qui gouverne l'effet des ondes de cisaillement. Nous savons pertinemment que $V_s = \frac{2L}{T}$, ce qui donne l'égalité suivante en écrivant :

$$V_s = 2LF_{rl}\ (cas\ de\ résonance) \qquad (1.30)$$

En remplaçant (1.30) dans (1.28) nous obtiendrons le module de cisaillement dynamique G_d (GPa) suivant :

$$G_d = 4^* L^{2\,*} {F_{rl}}^{2\,*} \rho^* 10^{-12} \qquad (1.31)$$

1.4.3.6.4. Module d'élasticité dynamique pour des vibrations de flexion

La relation entre la fréquence de résonance des vibrations de flexion f_F et le module d'élasticité dynamique $E_d$est donnée par :

$$E_d = \frac{64 f_F^2 m L^3 T}{(2k+1)^4 \pi^2 j} \qquad (1.32)$$

Où :

m : masse de l'éprouvette

L : longueur de l'éprouvette

k : ordre de l'harmonique

j : moment d'inertie de la section droite

T : facteur de correction.

Le facteur de correction T est déterminé par la géométrie de la section droite de l'éprouvette, le moment d'inertie, la longueur de l'échantillon, le coefficient de Poisson du béton et par l'ordre de l'harmonique.

1.4.3.6.5. Coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson peut être calculé à partir du module d'élasticité dynamique E_d déterminé par les modes de vibration longitudinal ainsi que le module de rigidité G_d en utilisant la formule suivante :

$$\mu_d = \frac{E_d}{2G_d} - 1 \qquad (1.33)$$

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les deux méthodes non destructifs avec leur objectifs, d'une part, l'essai d'ultrason pour déterminer la vitesse d'impulsion d'ultrason et d'autre part, la méthode basée sur la mesure de la fréquence de résonance. Les deux techniques ont été utilisées

et appliquées sur des éprouvettes cylindriques de béton confectionnées au sein de notre laboratoire en utilisant les matériaux locaux de la région de Tlemcen. A partir de la vitesse d'ultrason, nous pouvons estimer la résistance à la compression ainsi qu'a partir de la fréquence de résonance, nous pouvons calculer le module d'élasticité dynamique, le module de rigidité dynamique ainsi que le coefficient de Poisson du béton. Ces deux méthodes ont fait l'objet de notre choix dans le cadre de cette recherche pour les raisons suivantes :

- Mettre facilement en évidence les phénomènes associés à la dynamique structurelle (chocs, séismes, vibrations des ponts et toute source de vibration) ;
- Possibilité de spécifier plusieurs paramètres dynamiques ;
- Automatisez le mode de fonctionnement et éliminez les erreurs humaines grâce à la possibilité d'effectuer de nouveaux tests sans complication ;
- La disponibilité du matériel de test dans notre laboratoire ;
- Leurs propriétés non destructives par rapport aux matériaux en béton ;
- La nécessité de mesurer les propriétés dynamiques des matériaux que nous produisons car, dans la littérature, nous ne trouvons que des résultats sur des matériaux non locaux.

L'inclusion de différents matériaux cimentaires supplémentaires tels que la fumée de silice, le laitier de haut fourneau, les fillers calcaires et la pouzzolane naturelle comme faisant partie de liants pour le béton modifie les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durcis. Dans le chapitre deux suivant, nous allons présenter un état de l'art sur les paramètres influant les propriétés dynamiques et mécaniques du béton.

CHAPITRE 2

PARAMETRES INFLUANT LES PROPRIETES DYNAMIQUES ET MECANIQUES DU BETON

2.1. Introduction 43

2.2. Influence des additions sur les modules d'élasticité statique et dynamique..... .43

2.3. Influence des additions sur la résistance mécanique du béton…….....……48

2.4. Influence des additions minérales sur la vitesse d'impulsion d'ultrason…...……...…56

2.5. Relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression…..60

2.6. Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique 63

2.7. Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression…...65

2.8. Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique.68

2.9. Relation entre la porosité et la résistance à la compression…….....70

2.10. Conclusion…….....……...72

2.1. Introduction

La connaissance de certaines caractéristiques du béton tel que le module d'élasticité longitudinal, la résistance à la compression et la porosité sont essentielles pour le calcul et la conception des structures.

L'incorporation de différentes additions supplémentaires dans le liant peuvent modifier ces propriétés à l'état frais et à l'état durcis. En effet, leur utilisation comme matériaux de remplacement partiel du ciment ou comme additifs minéraux peut avoir différents effets sur les propriétés du béton. Ce chapitre résume les différents résultats de la littérature concernant l'influence de la fumée de silice, du laitier de haut fourneau, des fillers calcaires et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés dynamiques et mécaniques des bétons ainsi que les différentes relations qui existent entre les grandeurs mesurables tels que les modules d'élasticité statique et dynamique, la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression.

2.2. Influence des additions sur le module d'élasticité dynamique

Dans une étude, [Wainwringt et al., 1986] ont constaté que les bétons avec les laitiers ont des modules d'élasticité inférieurs à ceux des bétons témoins comme illustré sur la figure 2.1. Par contre, cette tendance s'inverse lorsque le taux des laitiers devient important.

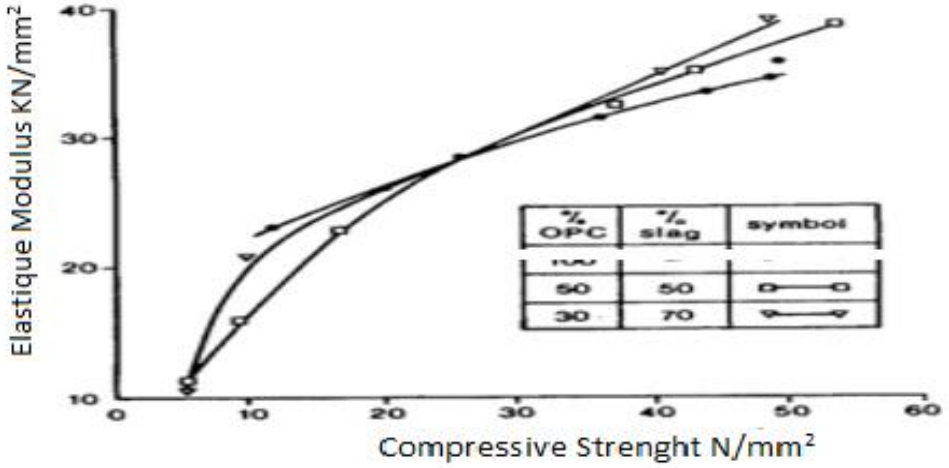

Figure 2.1 : Module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression des bétons durcis normaux avec et sans laitier [Wainwringt et al., 1986]

[Güneyisi et al., 2004] ont étudié le module d'élasticité des bétons caoutchoutés avec et sans fumée de silice en intégrant des caoutchoucs de pneu, caoutchouc granulé et les copeaux de pneu utilisés comme agrégats fins et grossiers à des teneurs variant entre 2,5% et 50% du volume total d'agrégat. Les mélanges ont été conçus avec des rapports E/C de 0,40 et 0,60. Les auteurs ont constaté que les modules d'élasticité des bétons avec la fumée de silice étaient de l'ordre de 36 à 47 GPa légèrement supérieures à ceux des bétons sans fumée de silice dont les valeurs oscillaient entre 33 et 46 GPa (figure 2.2).

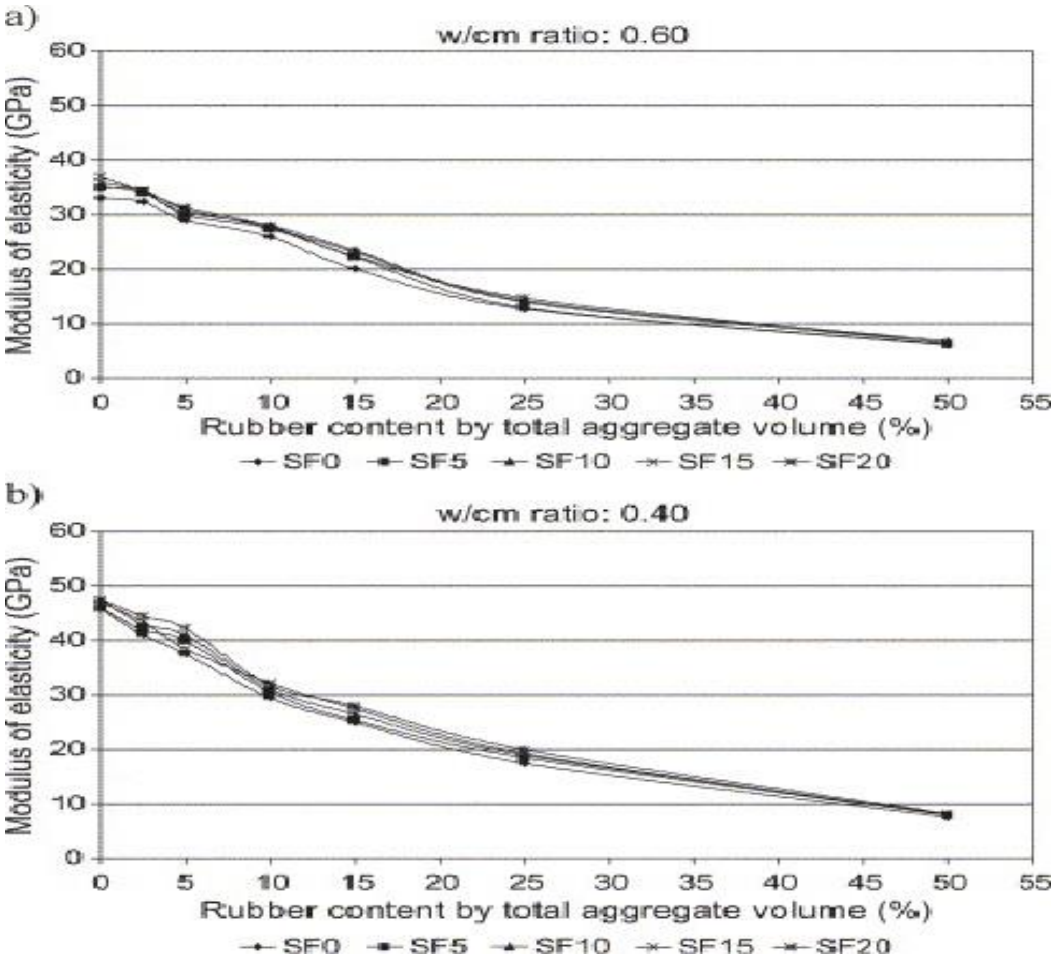

Figure 2.2 : Influence de la fumée de silice sur le module d'élasticité [Güneyisi et al., 2004]

[Ikbal khan, 2012] a étudié l'influence de la cendre volante combiné avec la micro-silice sur le module d'élasticité dynamique des bétons avec un rapport E/C = 0.30. Les résultats représentés par la figure 2.3 montrent que le module d'élasticité dynamique E_d du béton augmente avec l'âge.

Par ailleurs, E_d diminue en augmentant la teneur des cendres volante (FA) lorsque le taux des micros-silice est fixé. D'autre part, lorsque le pourcentage des Micro Silice (MS) augmente au-delà de 5% E_d augmente.

Toutefois, E_d semble se stabiliser à partir de 90 jours.

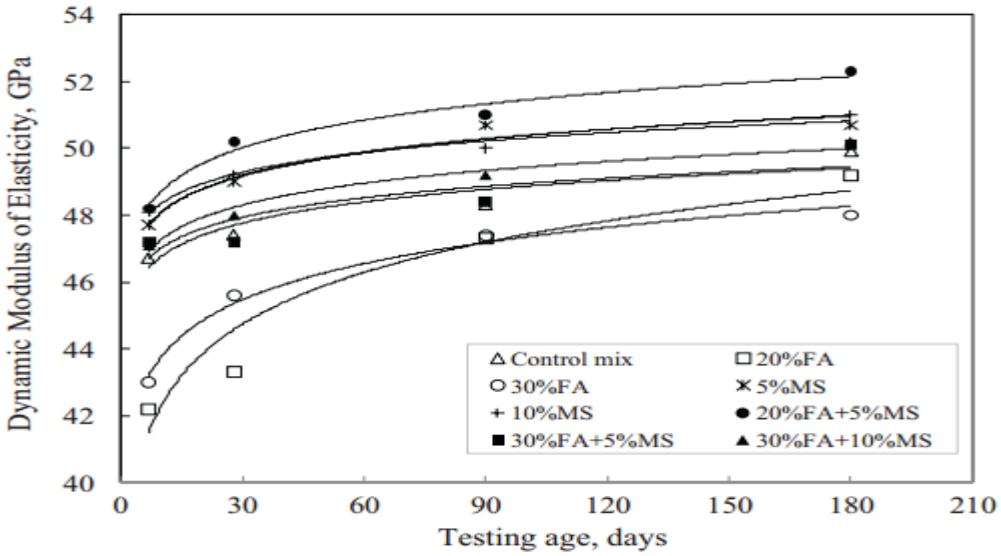

Figure 2.3 : Evolution du module d'élasticité dynamique du béton en fonction de l'âge contenant des composites cimentaires [Ikbal khan, 2012].

[Giner et al., 2012] ont étudié l'influence de la fumée de silice sur les fréquences de résonance longitudinales et transversales à 28, 56 et 90 jours (figure 2.4). Les chercheurs ont fait varier le pourcentage de la fumée de silice entre 5 et 15%. Cette addition a été utilisée parfois comme addition supplémentaire c'est-à-dire en plus de la quantité du ciment et parfois comme substitution du ciment. Dans cette étude, le béton de référence sans fumée de silice donne les meilleurs résultats des modules d'élasticité dynamiques par rapport aux autres bétons. Toutefois, le module d'élasticité dynamique du béton diminue lorsque le pourcentage de la fumée de silice augmente et ceci dans les deux cas qu'elle soit utilisée comme additif ou substitution.

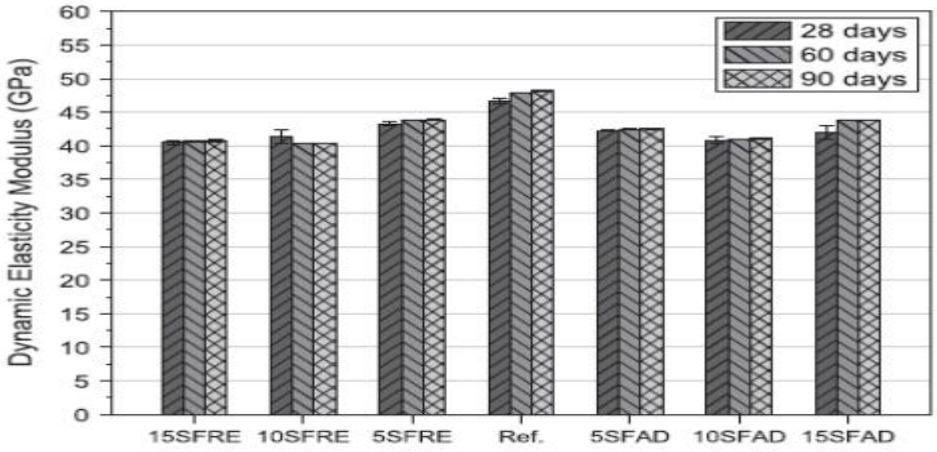

Figure 2.4 : Evolution du module d'élasticité dynamique en fonction du type d'addition [Giner et al., 2012]

[Shariq et al., 2013] ont étudié l'influence du module d'élasticité dynamique en fonction du temps sur trois mélanges de bétons contenant chacun le laitier de haut fourneau granulé moulu (LHFGM). Dans leur étude ils ont utilisé trois types de bétons en variant le dosage en liant de 320, 350 et 400 kg/m^3, soient les mélanges M1, M2 et M3 respectivement. Les résultats illustrés sur les figues. 2.5, 2.6 et 2.7 montrent l'évolution du module d'élasticité dynamique en fonction du temps. Les résultats obtenus montrent que le module d'élasticité dynamique est plus élevé pour le béton ordinaire témoin par rapport aux bétons avec 20%, 40% et 60% de LHFGM et cela pour les trois mélanges étudiés (M1, M2, M3) et ce si quel que soit l'âge du béton. Les auteurs ont aussi noté que le module d'élasticité dynamique des bétons contenant 40% du LHFGM est supérieur à celui des bétons avec 20 et 60 % de LHFGM au-delà de 40 jours.

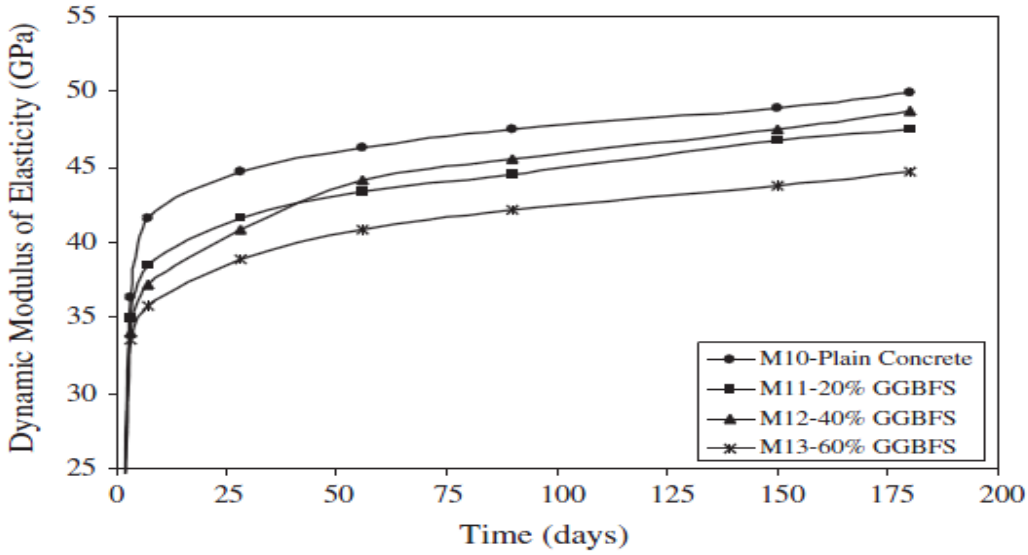

Figure 2.5 : Evolution du module d'élasticité dynamique du mélange M1 en fonction du temps [Shariq et al., 2013]

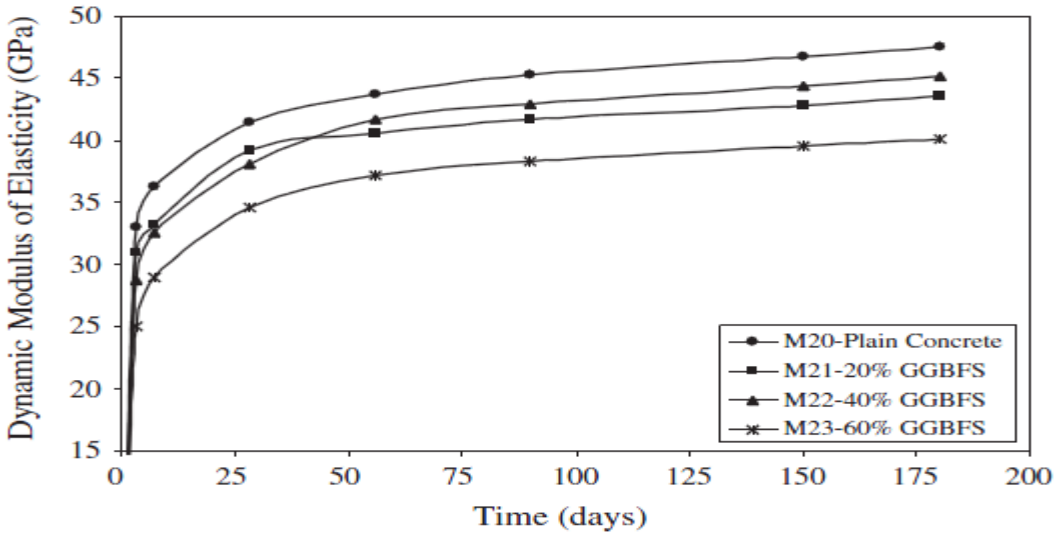

Figure 2.6 : Evolution du module d'élasticité dynamique du mélange M2 en fonction du temps [Shariq et al., 2013]

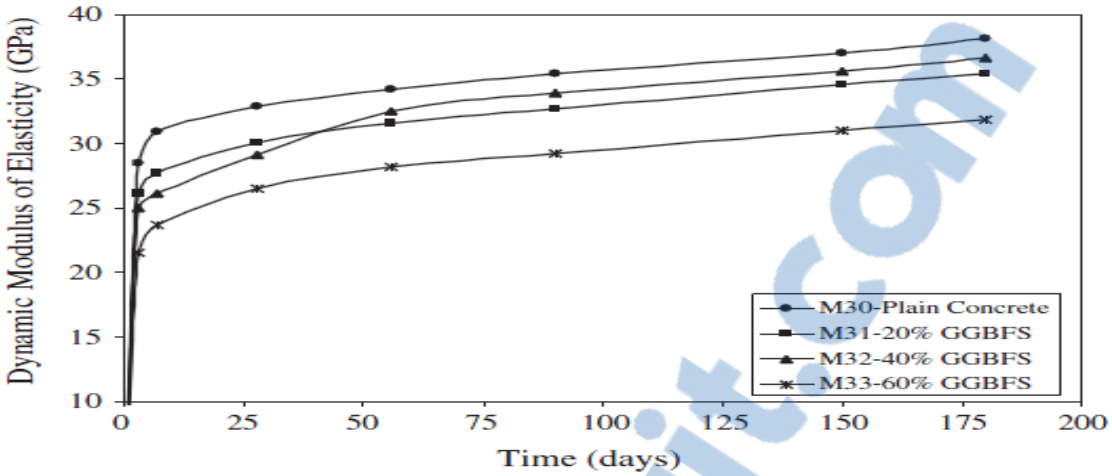

Figure 2.7 : Evolution du module d'élasticité dynamique du mélange M3 en fonction du temps [Shariq et al., 2013]

D'après ces observations, l'évolution du module d'élasticité dynamique en fonction de l'âge pour les bétons contenant du LHFGM est supérieure à celle du béton témoin. 40% de substitution du ciment par le LHFGM reste un pourcentage optimal.

[El Bahi et al., 2016] ont étudié l'influence des fillers calcaires et de la pouzzolane sur l'évolution du module d'élasticité dynamique en fonction du temps pour les mélanges de bétons contenant 10%, 20% et 30% d'additions avec un rapport E/C égale à 0.5. Les figures 2.8 et 2.9 montrent que de plus grandes additions en fillers calcaires et pouzzolane produisent une augmentation du module d'élasticité dynamique, sauf pour les 30% de pouzzolane. Probablement une telle tendance s'explique par le fait que la substitution du ciment par les additions conduit à des pâtes avec une compacité plus élevée. Toutefois, un taux de 10% de fillers calcaires et de la pouzzolane semble être un optimum.

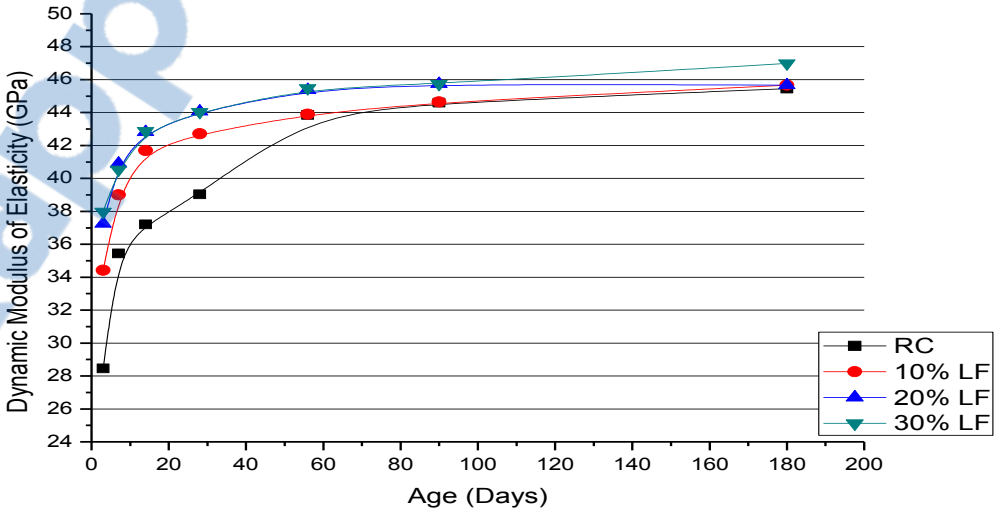

Figure 2.8 : Influence des fillers calcaires sur le module d'élasticité dynamique E_d (w/c=0.5) [El Bahi et al., 2016]

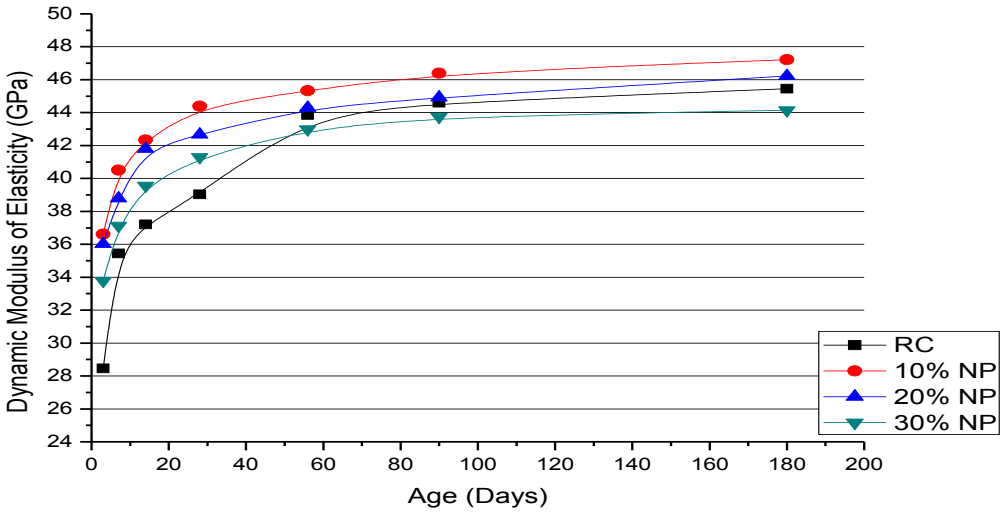

Figure 2.9 : Influence de la pouzzolane naturelle sur le module d'élasticité dynamique E_d (w/c=0.5) [El Bahi et al., 2016]

2.3. Influence des additions sur la résistance mécanique du béton

Dans une étude, [Hogan, 1981] a trouvé que les meilleures résistances à la compression ont été développées sur des bétons contenant 40% de laitiers et ce si pour les deux rapports E/L de 0,4 et 0,55. Toutefois, l'augmentation du rapport E/L a tendance à diminuer les résistances mécaniques sans pour autant influencer sur l'effet du pourcentage des additions (figures 2.10 et 2.11).

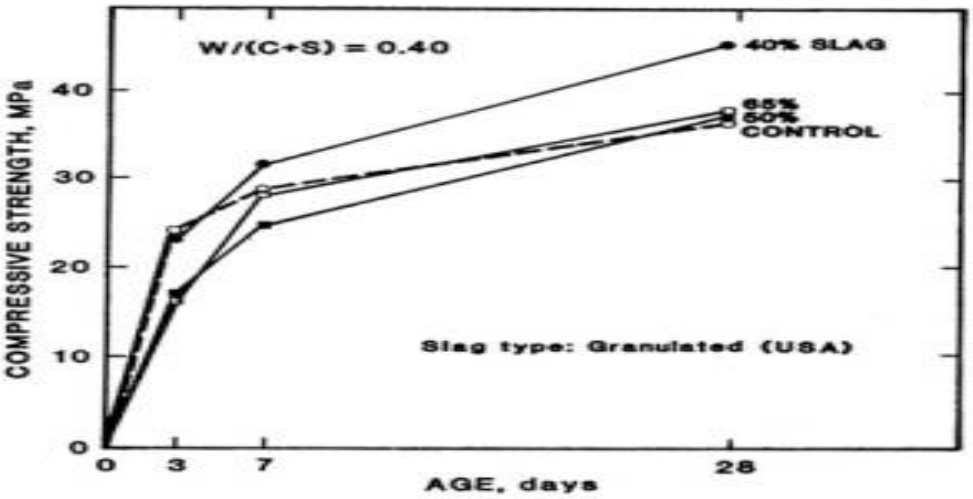

Figure 2.10 : Résistance à la compression à différents âges pour les bétons de ciment à laitier entraînés par l'air : W/(C+ S) = 0,4 [Hogan., 1981]

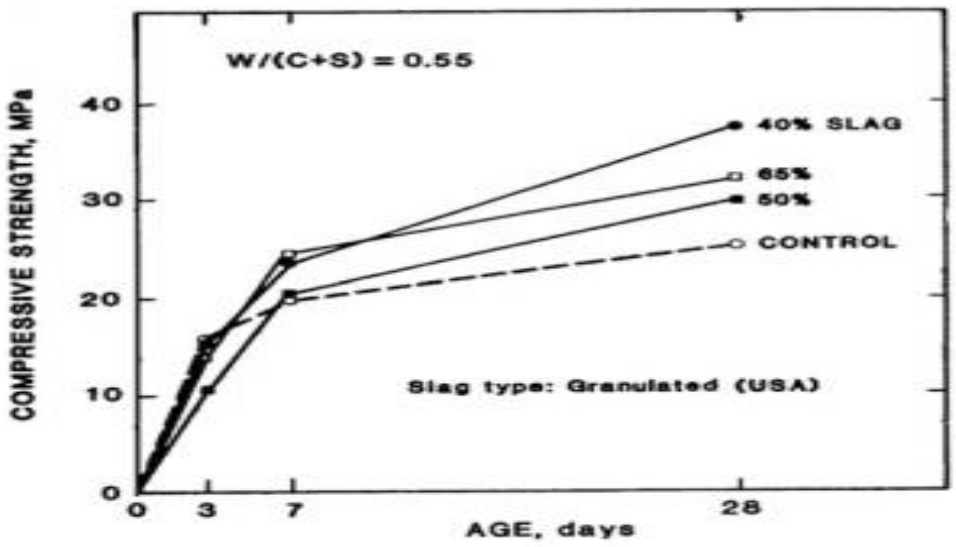

Figure 2.11 : Résistance à la compression à différents âges pour les bétons de ciment à laitier entraînés à l'air : W / (C+ S) = 0,55 [Hogan., 1981]

[Mazloom et al., 2004] ont étudié l'influence de la fumée de silice à des pourcentages de 6, 10 et 15% sur la résistance à la compression des bétons sur une période de durcissement de 400 jours. Ils ont observé que pendant les premiers 28 jours, la résistance du béton avec la fumée de silice était supérieure à celle du béton témoin de 21%. Toutefois, cette différence devenait négligeable au-delà de 90 jours (tableau 2.1). Wild et al. (1995) ont expliqué ce constat par la formation rapide d'une couche inhibitrice au-delà de 90 jours empêchant une nouvelle réaction de la fumée de silice avec de l'hydroxyde de calcium.

Tableau 2.1 : Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction de l'âge [Mazloom et al., 2004]

Type de mélange	Fumée de silice (%)	La résistance à la compression (MPa)						
		7 jours	14 jours	28 jours	42 jours	90 jours	365 jours	400 jours
OPC	0	46	52	58	62	64	73	74
FS6	6	50.5	58	65	69	71	73	73
FS10	10	52	61	97.5	71	74	73	73
FS15	15	53	63	70	73	76	75	76

Dans une autre étude, [Toutanjia, et al., 2004] ont montré d'une part, que l'addition de la fumée de silice engendre la plus grande valeur de la résistance par rapport aux autres additions minérales que ce soit la cendre volante ou les laitiers (figure 2.12). L'addition de 8, 10 et 15% de la fumée de silice augmente approximativement la résistance à la compression de 33%, 32% et 21% respectivement par rapport aux autres poudres. L'addition de 8% de la fumée de silice reste la teneur optimale qui engendre la plus grande résistance. D'autre part, les bétons avec

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

70% de laitier semblaient produire une résistance optimale par rapport aux mélanges avec 60% et 80% de laitiers. 70% de laitier a entraîné une augmentation de la résistance d'environ 15% par rapport à celle du béton ordinaire, alors que 60 et 80% de laitier ont entraîné une augmentation seulement de 5% environ.

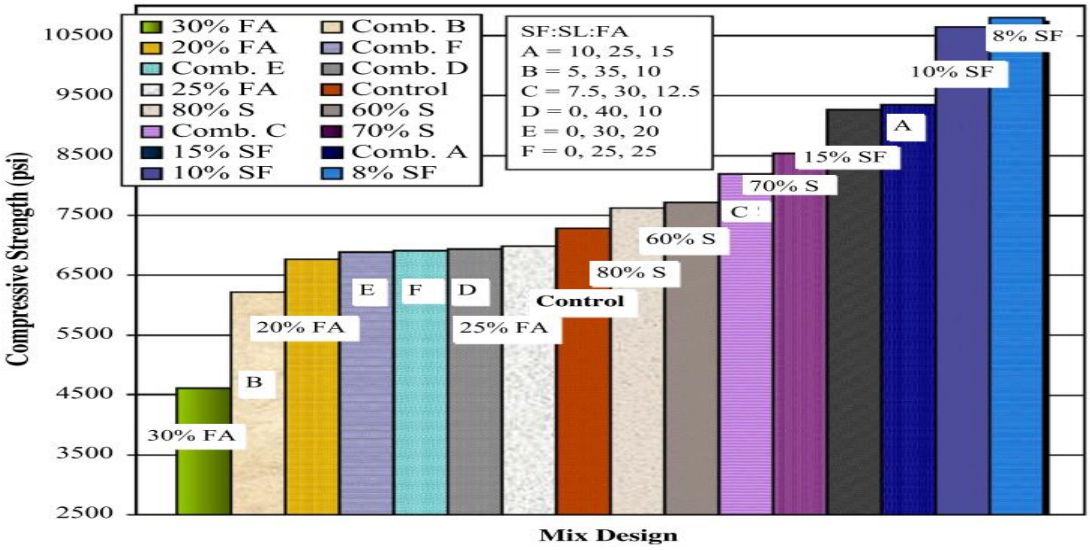

Figure 2.12 : Performance de la résistance à la compression pour tous les mélanges [Toutanjia et al., 2004]

Les résultats de [Demirboga et al., 2004] sont présentés sur le tableau 2.2. Dans cette étude, les résultats montrent que l'incorporation du laitier de haut fourneau (LHF) a induit une chute de la résistance à la compression quel que soit l'âge c'est-à-dire à 3, 7, 28 et 120 jours. Selon [Tasdemir et al., 1997], cette diminution surtout au jeune âge peut être due à la faible chaleur d'hydratation du laitier de haut fourneau. Reeves (1986) a lui aussi montré auparavant que l'utilisation du LHF implique une chaleur d'hydratation plus faible. Ainsi, l'hydratation devient plus lente [Orchard, 1979].

Tableau 2.2 : La résistance à la compression des bétons à base du laitier de haut fourneau [Demirboga et al., 2004]

Type de béton		La résistance à la compression (MPa)			
		3 jours	7 jours	28 jours	120 jours
Béton de référence		27.9	38.1	43.6	54.6
LHF (%)	50	9	20	35	50.2
	60	7.5	17.8	32.3	45.4
	70	4.9	15.1	26.4	37.4

[Ghrici et al., 2006] ont étudié l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à différents âges (figure 2.13).

Les résultats indiquent que la résistance pour des mortiers avec pouzzolane est toujours inférieure à celle du mortier sans additions quel que soit la période de maturation. Cette différence s'amplifie en augmentant le taux de la pouzzolane.

Toutefois, les résistances mécaniques semblent se stabiliser au-delà de 28 jours pour l'ensemble des mortiers.

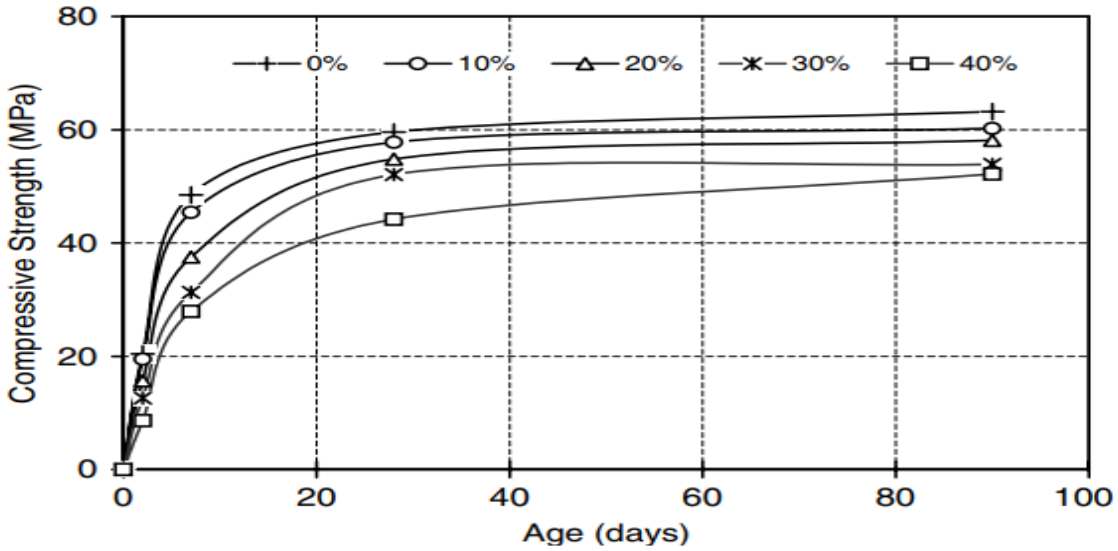

Figure 2.13 : Influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression [Ghrici et al., 2006]

Dans une autre recherche, [Mouli et al., 2008] ont fait varier le pourcentage de la pouzzolane naturelle sur des bétons légers (figure 2.14). Les auteurs ont abouti à la conclusion que le gain de résistance à l'âge précoce du mélange témoin sans pouzzolane était nettement supérieur à celui des mélanges avec pouzzolane. A titre d'exemple, la résistance à la compression chute de 34,2 à 18,6 MPa après 7 jours de durcissement lorsque le taux de pouzzolane augmente de 10 à 50%.

Toutefois, au-delà de 28 jours, les résistances à la compression du béton avec 10 ou 20% de pouzzolane étaient supérieures à celles du béton témoin. Par ailleurs, les résistances des bétons avec 40% et 50% de pouzzolane sont toujours inférieures à celles du béton témoin quel que soit les âges.

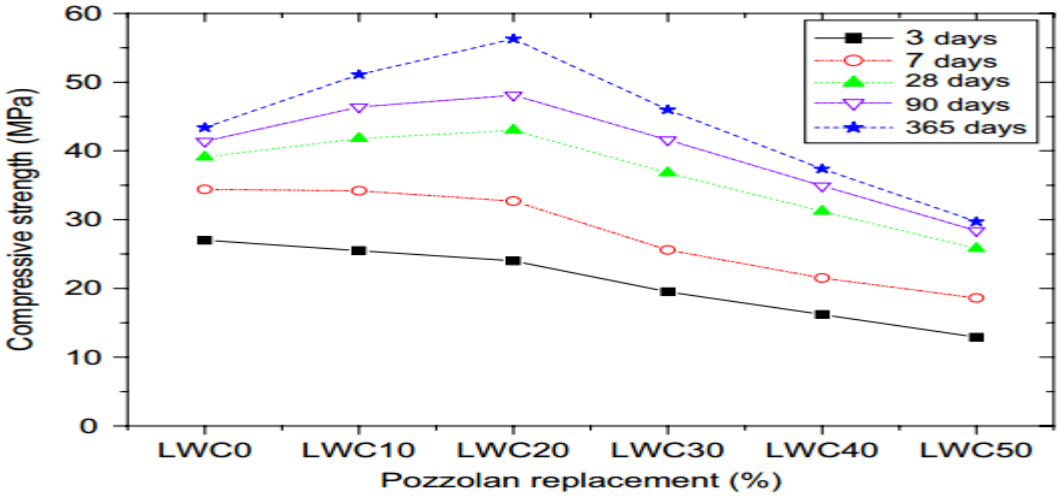

Figure 2.14 : Influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression [Mouli et al., 2008]

[Ramezanianpour et al., 2010] ont étudié l'effet des fillers calcaires à des taux atteignant jusqu'à 20% sur les propriétés mécaniques des bétons. Les résultats obtenus ont montré que la résistance à la compression de tous les bétons augmente avec la période de durcissement. Cependant, lorsque le pourcentage de substitution du ciment par des fillers calcaires augmente, la résistance à la compression diminue généralement (figure 2.15).

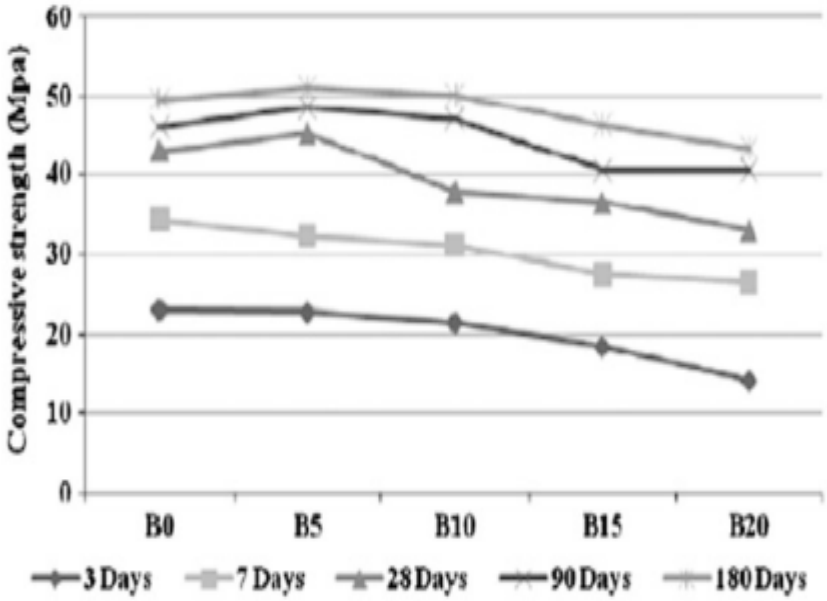

Figure 2.15 : Effet du calcaire sur la résistance à la compression à différents âges [Ramezanianpour et al., 2010]

[Giner et al., 2011], ont étudié l'effet de la fumée de silice sur les propriétés mécaniques du béton. Les résultats obtenus montrent clairement que la fumée de silice entraîne une

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

augmentation de la résistance à la compression. Cet effet est proportionnel à la quantité de fumée de silice intégrée dans le mélange (figure 2.16).

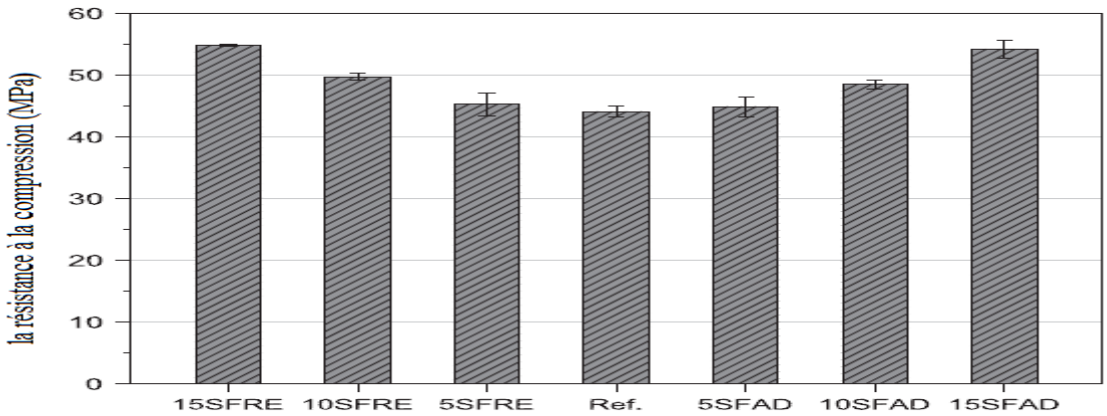

Figure 2.16 : Influence de la fumée de silice sur la résistance à la compression [Giner et al., 2011]

[Bederina et al., 2011] ont étudié l'influence des fillers calcaires sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons selon la norme NFP 18-406 (1981). Les résultats ont montré que la résistance à la compression est maximale lorsque le pourcentage de substitution du ciment par des fillers calcaires est égal à 5%. Au-delà de ce pourcentage et avec l'augmentation du taux des fillers, la résistance à la compression diminue. Nous pouvons donc déduire que 5% de fillers offre pratiquement une compacité optimale au mélange (figure 2.17).

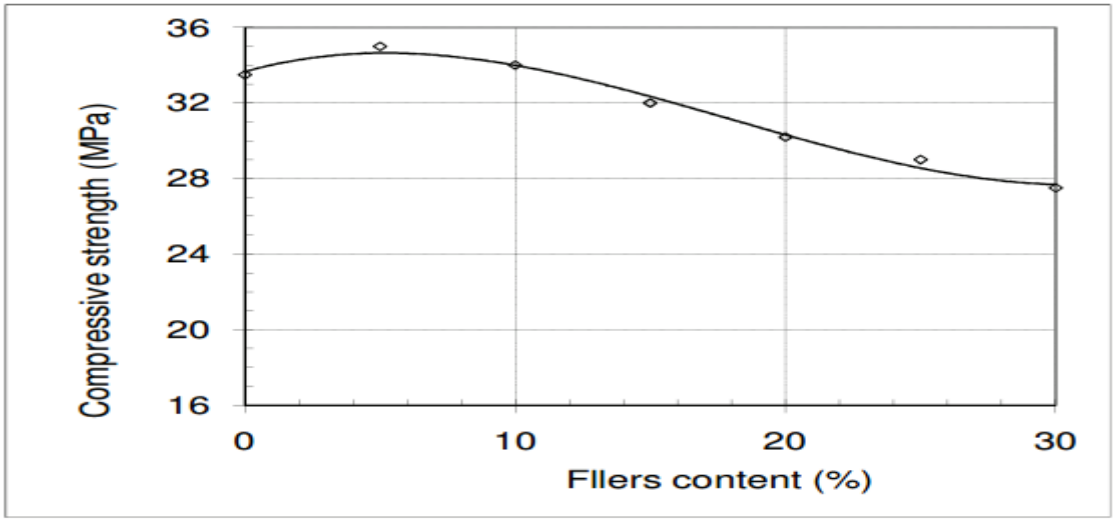

Figure 2.17 : Evolution de la résistance à la compression en fonction des fillers calcaires [Bederina et al., 2011]

[Debouchaa et al., 2015] ont étudié l'effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression du béton sur une période de 90 jours. L'introduction de la pouzzolane naturelle par substitution au ciment a induit toujours à une réduction de la résistance mécanique quelque soit l'âge de maturation (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression du béton à différents âges [Debouchaa et al., 2015]

Type de béton	La résistance à la compression (MPa)		
	7 jours	28 jours	90 jours
C-PC	26.56	35.42	49.35
10PN	25.77	30.84	43.415
20NP	19.03	25.31	43.03
30NP	16.50	24.54	33.55
40NP	12.58	21.42	27.11

[Celik et al., 2015] ont aussi travaillé sur les propriétés mécaniques, durabilité et évaluation du cycle de vie des bétons auto-plaçants à base d'un liant composé de ciment portland, de cendres volantes et des fillers calcaires (figure 2.18). Les auteurs ont constaté que l'augmentation de la teneur en fillers calcaires s'accompagne toujours avec une diminution de la résistance.

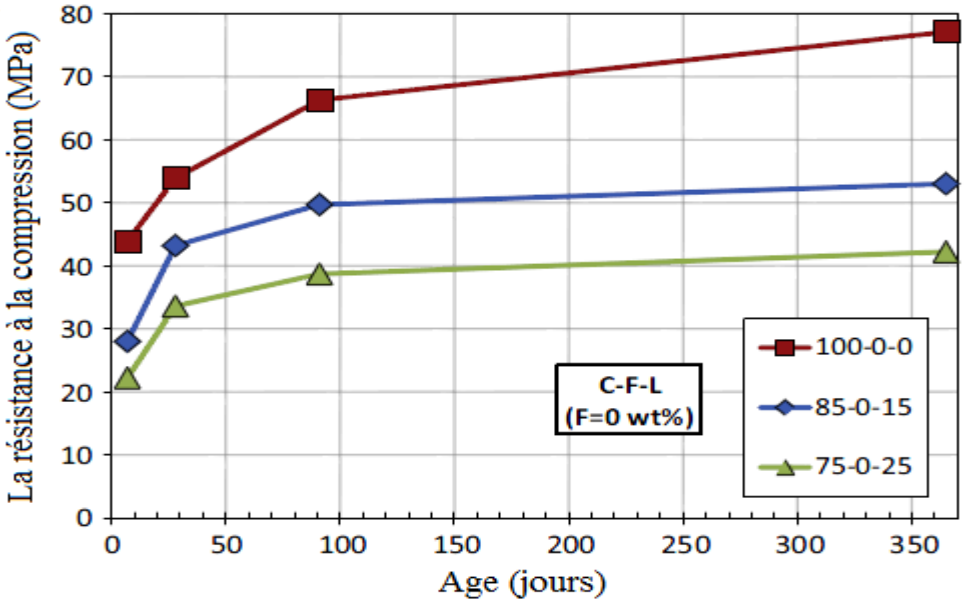

Figure 2.18 : Evolution de la résistance à la compression des bétons auto-plaçants à base de fillers calcaires (15 et 25%) [Celik et al., 2015]

[El Bahi et al., 2016] ont étudié l'influence des fillers calcaires et de la pouzzolane sur l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les mélanges de bétons contenant 10%, 20% et 30% d'additions avec un rapport E/C égale à 0.5. Les figures 2.19 et 2.20 montrent qu'en utilisant les proportions de mélange adoptées et en substituant le ciment par les additions, la teneur en ciment peut être réduite de 20% et 10%, pour les fillers calcaires et la pouzzolane, respectivement, et encore les résistances à la compression à 28 jours restent comparables à ceux du béton de référence.

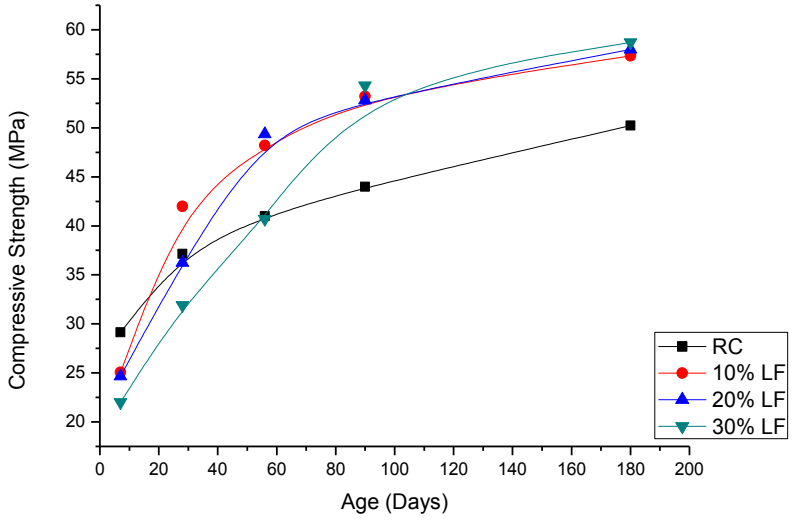

Figure 2.19 : Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression f_{cu} (w/c=0.5) [El Bahi et al., 2016]

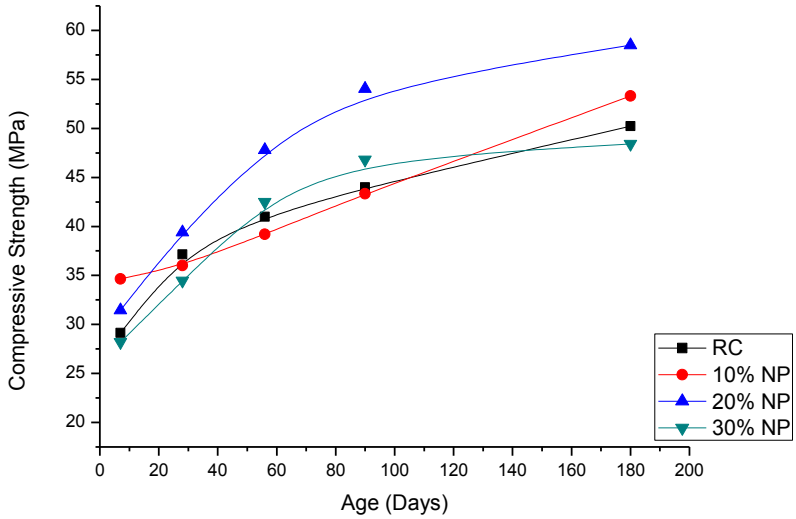

Figure 2.20 : Influence de la pouzzolane sur la résistance à la compression f_{cu} (w/c=0.5) [El Bahi et al., 2016]

En 2017, [Taleb et al., 2017] ont étudié l'influence de deux additions : la pouzzolane (BP) et les fillers calcaires (BF) sur la résistance mécanique des bétons autoplaçants à des taux pouvant atteindre jusqu'à 50% (tableau 2.4). Ils ont constaté que la substitution du ciment par l'une des deux additions s'accompagne toujours par une diminution de la résistance. Toutefois, l'utilisation de la pouzzolane semble être plus bénéfique par rapport aux fillers calcaires.

Tableau 2.4 : Caractérisation des BAP en fonction du type et du taux des additions

[Taleb et al., 2017]

ID	Etalement (mm)	V-Funnel (s)	Stabilité (%)	Résistance (MPa)
BF0	660	6.50	9.65	52.7
BF10	675	6.50	8.51	46.8
BF20	690	6.21	6.80	42.3
BF30	655	11.8	5.68	33.1
BF40	595	15.7	3.98	26.2
BF50	585	19.1	3.21	24.3
BP0	730	9.96	9.48	53.6
BP10	700	13.47	5.72	47.2
BP20	690	19.28	3.47	42.9
BP30	640	20.74	1.33	37.6
BP40	580	24.53	0.67	35.2
BP50	490	Bloc	0.56	27.0

2.4. Influence des additions minérales sur la vitesse d'impulsion d'ultrason

Les résultats de l'UPV sur des bétons auto-plaçants des recherches de [Ulucan et al., 2008] présentés sur la figure 2.21 ont montré que les valeurs des UPV diminuent généralement avec l'augmentation du pourcentage en cendre volante. Toutefois, les valeurs de l'UPV augmentaient en raison de la formation d'un autre hydrate de silicate de calcium (C-S-H) (Nassif et al., 2003), et aussi à cause de la capacité de remplissage et d'empilement des particules de la fumée de silice (figure 2.22). Toutefois, un taux de 30% de cendres volantes semble être un optimum notamment sur une période de maturation supérieure à 28 jours.

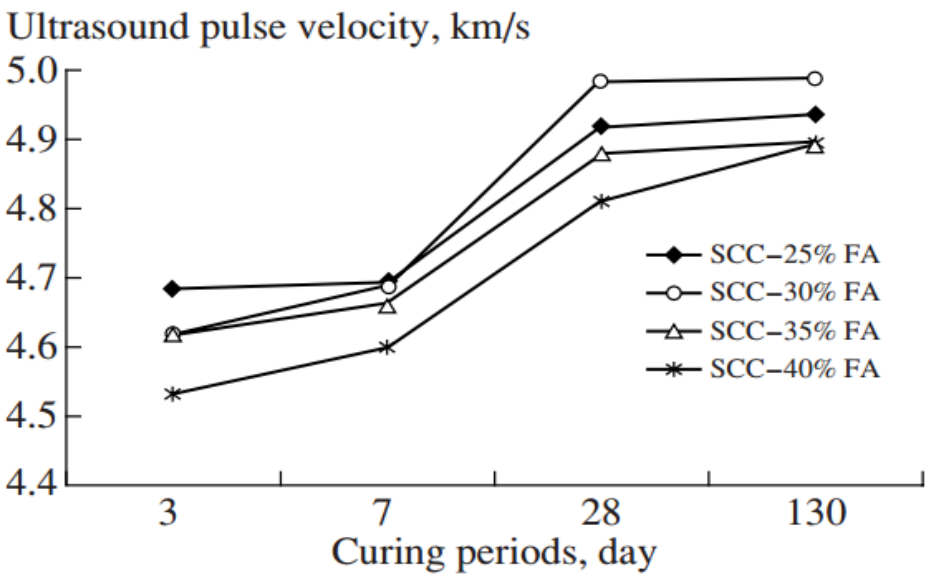

Figure 2.21 : Résultats des UPV pour SCC avec FA pour différentes durées de maturation [Ulucan et al., 2008]

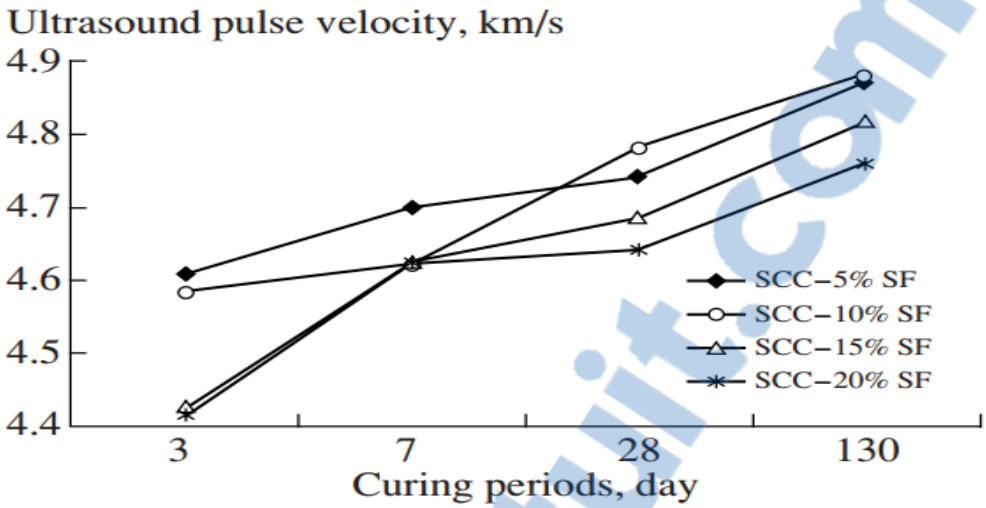

Figure 2.22 : Influence de la fumée de silice sur l'UPV pour un BAP [Ulucan et al., 2008]

La figure 2.23 présente les résultats d'étude de [Iqbal Khan, 2012]. L'auteur montre que la vitesse d'impulsion ultrasonique du béton augmente en fonction du temps et diminue avec l'augmentation de la cendre volante. Généralement les résultats montrent aussi clairement que l'ajout de la micro silice augmente l'UPV pour tous les mélanges étudiés. En plus, pour des périodes de maturation avancées, la perte de l'UPV dû à cause de la présence des cendres volantes a été compensée par l'ajout de la micro silice. Le gain tardif de la résistance des cendres volantes est dû à sa réaction pouzzolanique retardée (Sarkar et al., 1991).

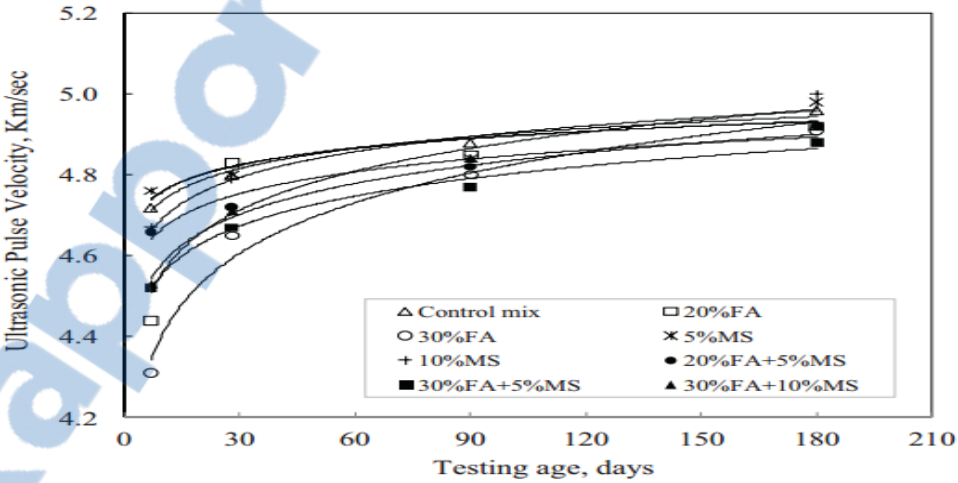

Figure 2.23 : Vitesse d'impulsion ultrasonore du béton contenant des composites cimentaires [Iqbal Khan, 2012]

[Shariq et al., 2013] ont étudié l'effet du LHFGM sur la qualité des bétons en variant le dosage en liant de 320, 350 et 400 kg/m^3, soient les mélanges M1, M2 et M3 respectivement. Dans cette étude, les valeurs des UPV ont aussi diminué avec l'augmentation du (%) du LHFGM.

L'évolution expérimentale du LHFGM sur l'UPV en fonction du temps est représentée sur les figures 2.24, 2.25 et 2.26 pour les trois groupes de mélanges cités précédemment. Les résultats montent que l'UPV du béton augmente en fonction du temps. En plus, l'UPV du béton à base du LHFGM a été jugée inférieure par rapport à celle du béton ordinaire quel que soit le pourcentage du LHFGM et pour toute la période de durcissement. Ce constat peut être du aux faibles réactions d'hydratation et aussi à la porosité du squelette solide de la matrice du béton. Cependant, les auteurs montrent qu'après l'âge de 56 jours la valeur de l'UPV du béton à 40% du LHFGM, est plus élevée par rapport aux bétons avec 20 et 60% de LHFGM.

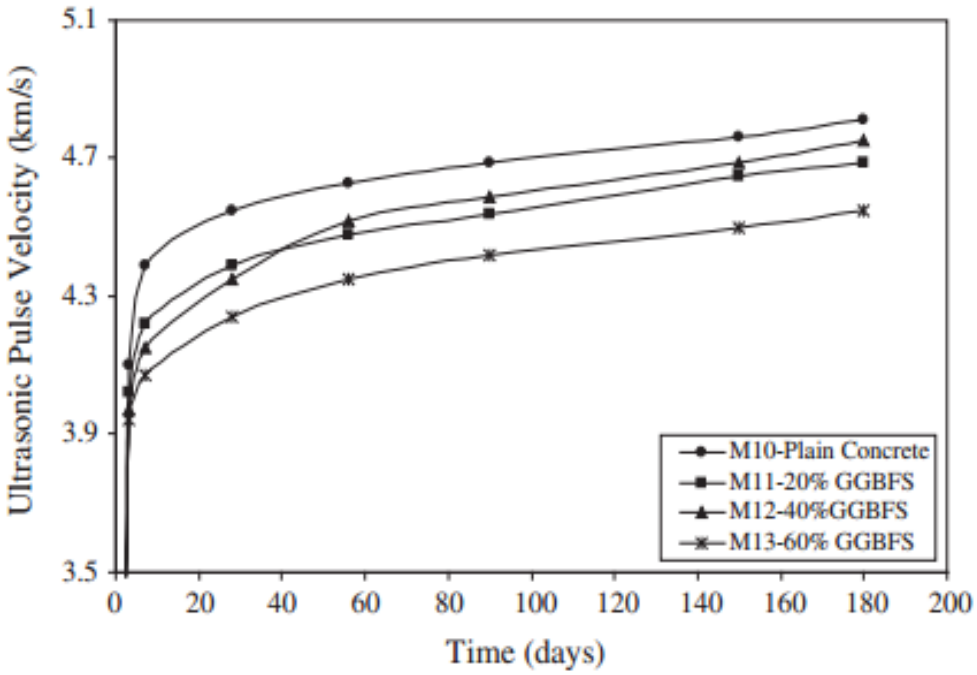

Figure 2.24 : Evolution de l'UPV du béton avec l'âge pour le groupe de mélange M1 [Shariq et al., 2013]

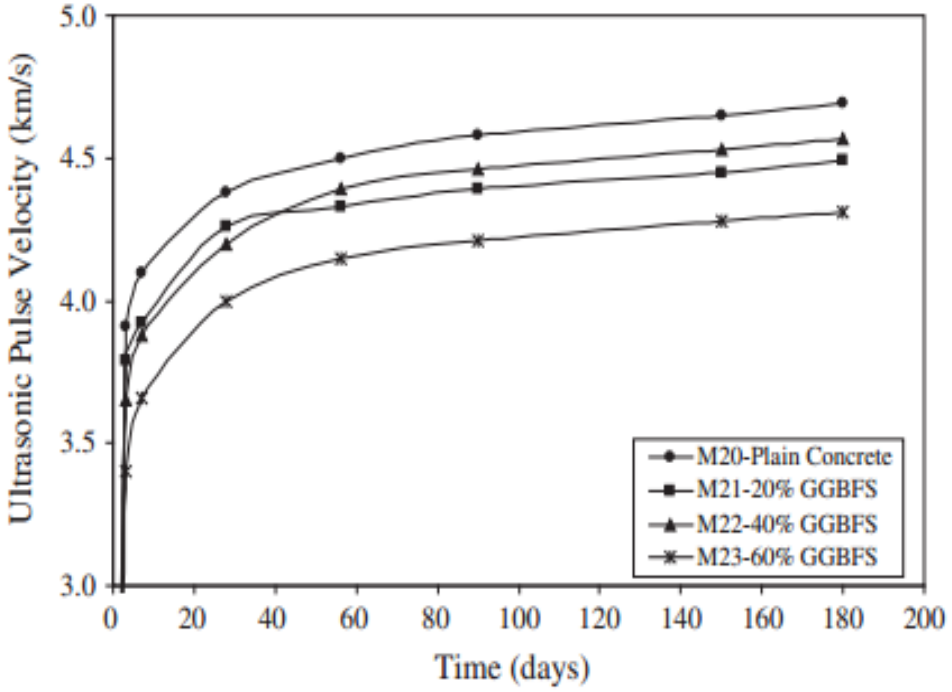

Figure 2.25 : Evolution de l'UPV du béton avec l'âge pour le groupe de mélange M2 [Shariq et al., 2013]

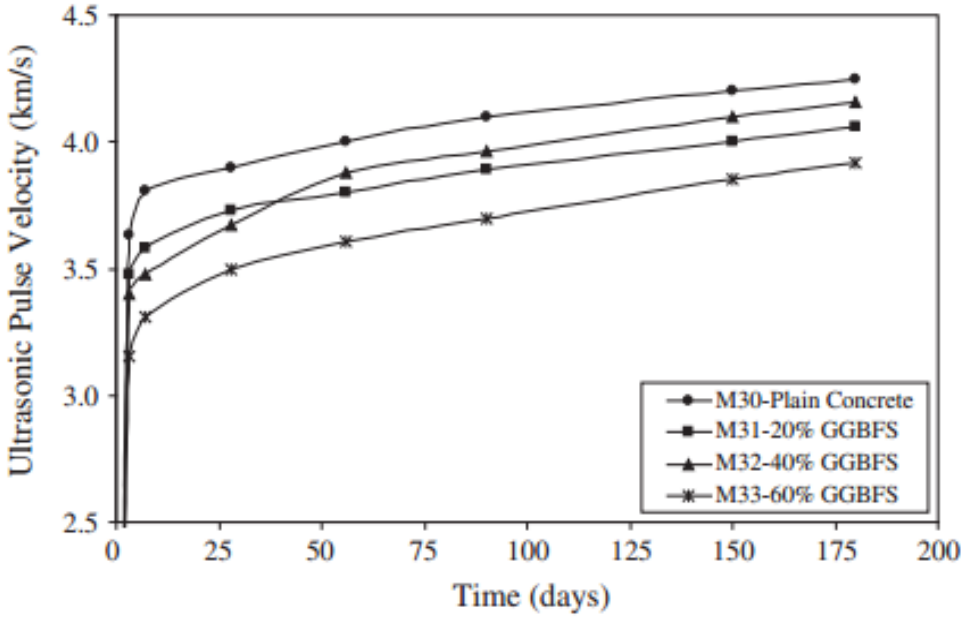

Figure 2.26 : Evolution de l'UPV du béton avec l'âge pour le groupe de mélange M3 [Shariq et al., 2013]

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.5. Relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression

Les résultats de l'étude de [Han et al., 2004] sur l'influence de la température et de l'âge sur la relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression du béton sont illustrés sur les figues. 2.27, 2.28 et 2.29.

Pour le béton de ciment type I,

$$f_c^{'} = \alpha E_c^{\beta} = \alpha[E_d(1 - 0.492e^{-0.0177E_d})]^{\beta} \quad (2.1)$$

Pour le béton de ciment type II,

$$f_c^{'} = \alpha E_c^{\beta} = \alpha[E_d(1 - 0.708e^{-0.0268})]^{\beta} \quad (2.2)$$

Où

f_c : résistance à la compression (MPa) ; α et β sont des constantes

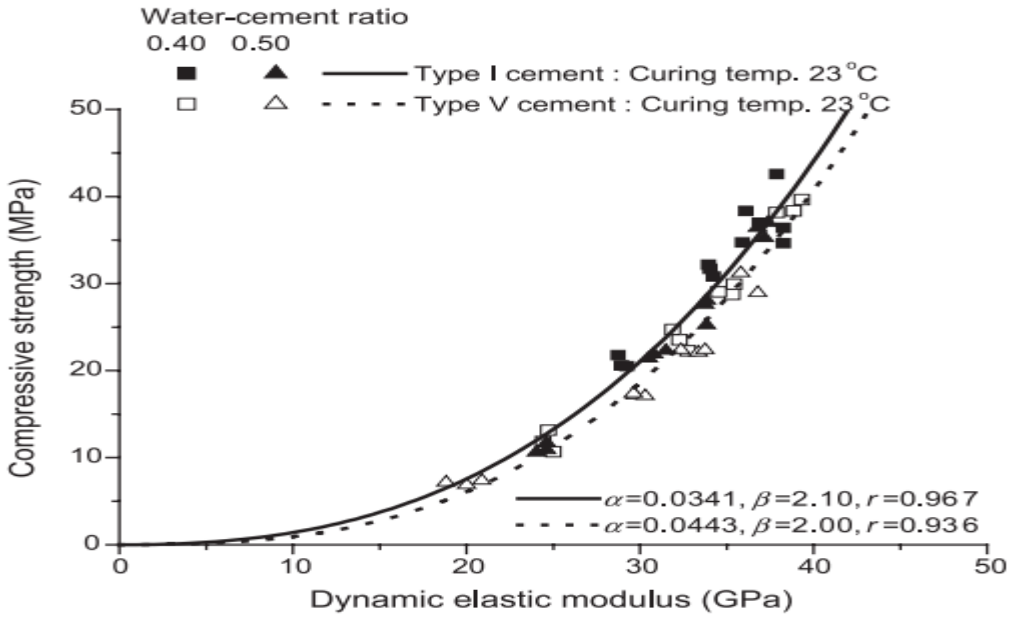

Figure 2.27 : Relations entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression pour différents types de ciment [Han et al., 2004]

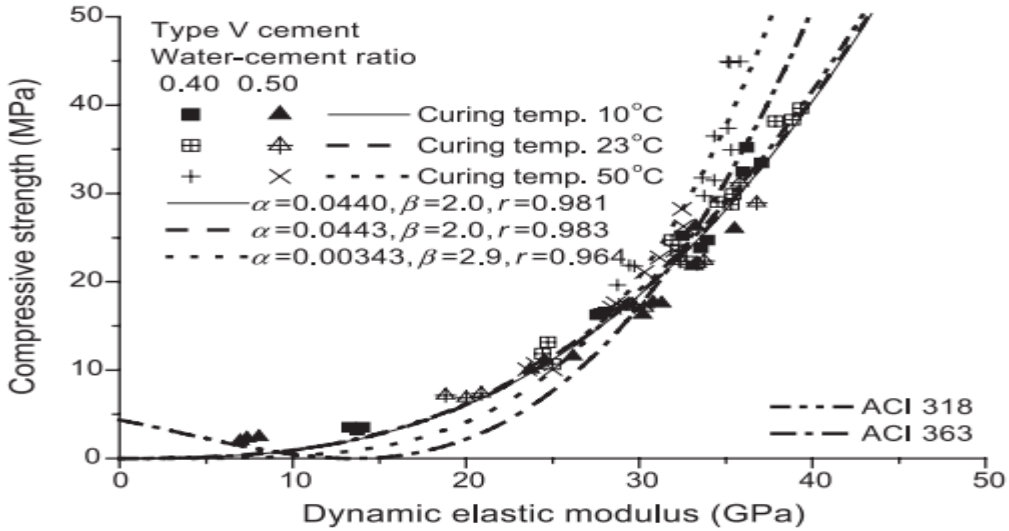

Figure 2.28 : Relations entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression pour différentes températures de durcissement [Han et al., 2004]

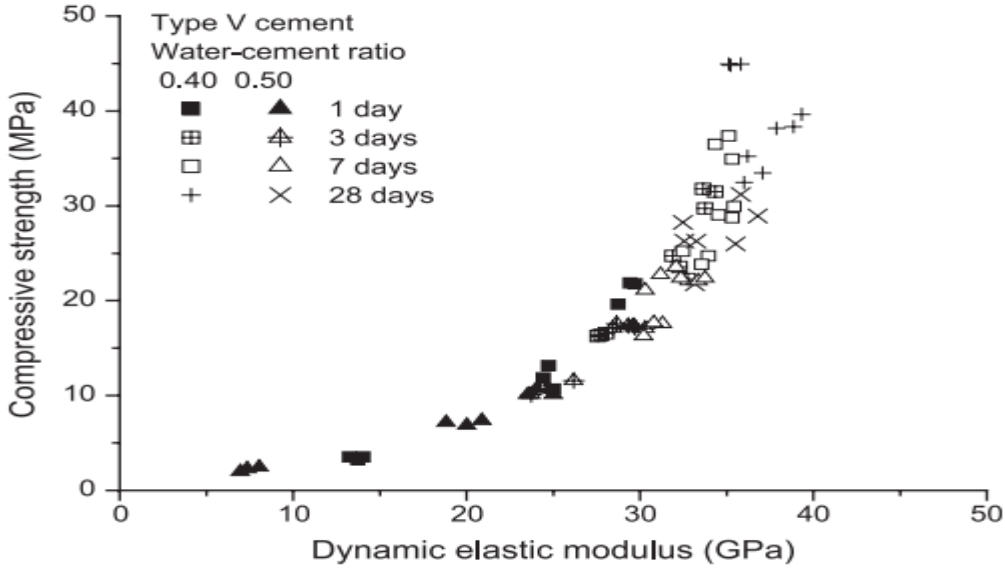

Figure 2.29 : Relations entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression pour différents âges [Han et al., 2004]

[MegatJohari et al., 2011] ont étudié l'évolution du module d'élasticité dynamique du béton E_d (GPa) en fonction de la résistance à la compression f_{cu} (MPa) comme indiqué sur la figure 2.30. Ils ont trouvé que le module d'élasticité dynamique est lié à la résistance à la compression par l'équation suivante :

$$E_d = 3.57 f_{cu}^{\frac{1}{2}} + 16.6 \qquad (2.3)$$

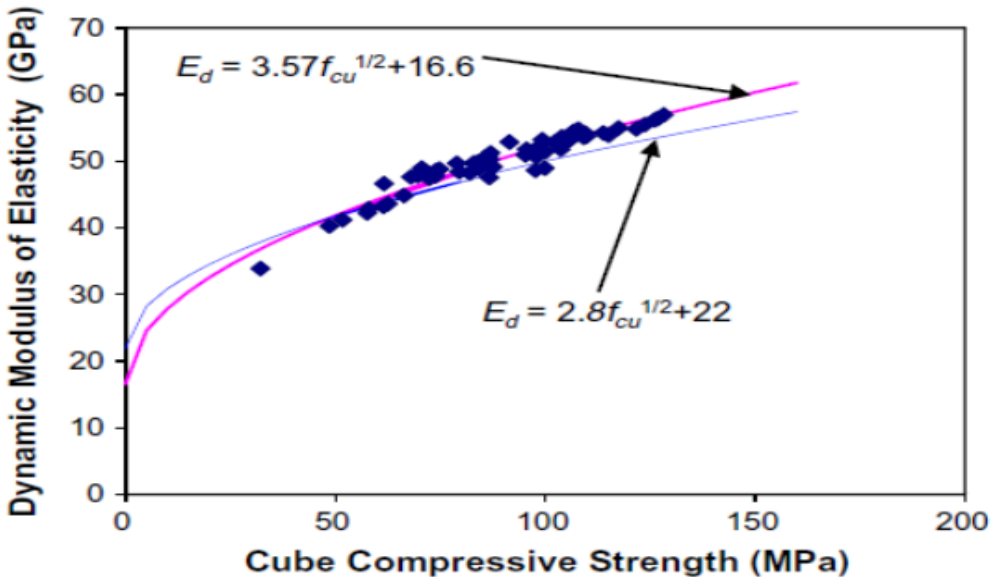

Figure 2.30 : Evolution du module d'élasticité dynamique en fonction de la résistance à la Compression [Megat Johari et al., 2011]

Le coefficient de détermination R² obtenue pour l'équation 2.3 est de 0,92. Cette valeur élevée de R² indique que le module d'élasticité dynamique du béton à haute performance peut être exprimé avec succès en fonction de la résistance à la compression sur des éprouvettes cubiques par l'équation 2.3.

Brooks et al (1983) ont trouvé aussi une relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression sur des échantillons cubiques. Cette relation est donnée dans le CP110 comme suit :

$$E_d = 2.8f_{cu}^{1/2} + 22 \qquad (2.4)$$

[Iqbal Khan, 2012] a étudié l'évolution du module d'élasticité dynamique du béton E_d(GPa) mesuré sur des éprouvettes prismatique (10 x 10 x 50) cm en fonction de la résistance à la compression f_{cu} (MPa). La relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression f_{cu} est comme suit :

$$E_d = 22f_{cu}^{0.175} \qquad (2.5)$$

L'équation 2.5 est obtenue avec un coefficient de détermination R² de 0.60. Toutefois, la figure 2.31 montre que pour les valeurs de résistances à la compression élevées (supérieures à 85 Mpa), la corrélation est meilleure que celle correspondante aux valeurs de résistances à la compression plus faibles (inférieures à 85 MPa).

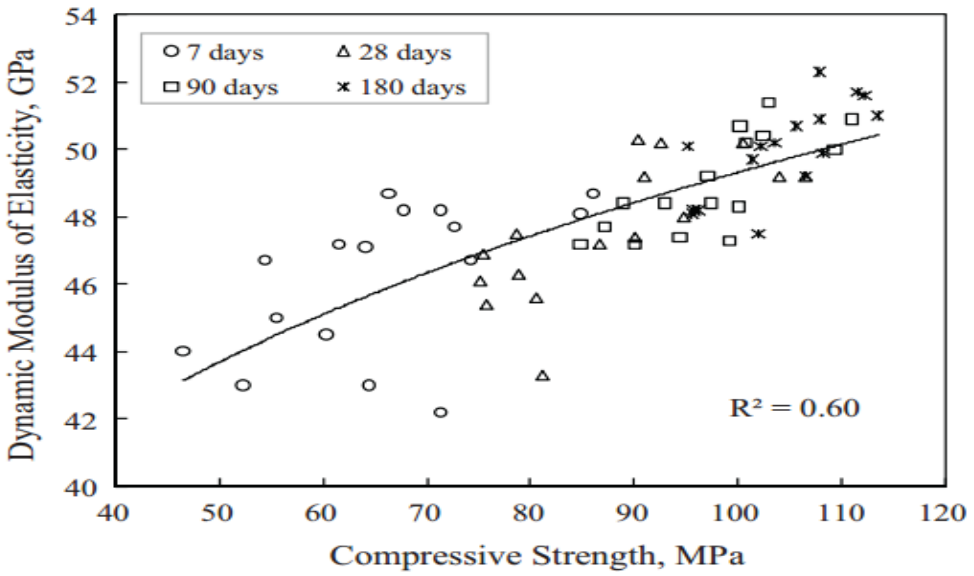

Figure 2.31 : Relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression [Iqbal Khan, 2012]

2.6. Relation entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique

Les principales corrélations entre le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique de la littérature sont regroupées dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Les relations entre les modules d'élasticité statique et dynamique [(Lydon et al., 1986), (CP110, 1972), (Popovics, 1975) et (Swamy et al., 1975)]

Auteurs	Equation	N°
Lydon et al., 1986	$E_s = 0.83E_d$	(2.6)
CP110, 1972	$E_s = 1.25E_d - 19$	(2.7)
Popovics, 1975	$E_s = KE_d^{1.4}\rho^{-1}$	(2.8)
Swamy et al., 1975	$E_s = 1.25E_d - 19$	(2.9)

Où

E_d et E_s sont exprimés en GPa.

A partir de ces équations, nous remarquons que la relation entre les modules statique et dynamique n'est pas influencée par la méthode de murissement ou les conditions d'essais ou encore par le type de liant utilisé (Neville, 2000).

[Han et al., 2004], ont étudié l'effet du type de ciment sur la relation entre les modules d'élasticité dynamique et statique du béton. Cette relation est indiquée par l'équation 2.10.

$$E_c = E_d(1 - ae^{-bE_d}) \qquad (2.10)$$

Où

E_c : le module d'élasticité statique (GPa), E_d : le module d'élasticité dynamique (GPa) et (a et b) : constantes.

Il est clair que lorsque le module d'élasticité dynamique augmente, le module d'élasticité statique augmente (figure 2.32).

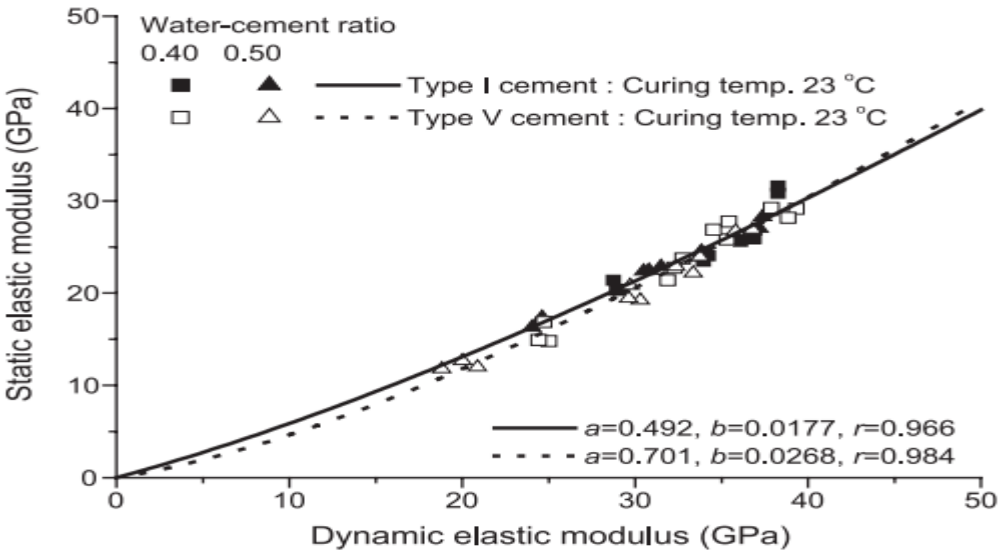

Figure 2.32 : Relation entre les modules d'élasticité dynamique et statique pour deux types de ciment et un murissement à 23 °C [Han et al., 2004)]

[Megat Johari et al., 2011] ont développé une autre relation pour estimer le module d'élasticité statique à partir du module d'élasticité dynamique pour des bétons à hautes performances contenant des ajouts cimentaires. Cette relation est présentée par l'équation (2.11) et la figure 2.33.

$$E_s = 0.88E_d \qquad (2.11)$$

Avec E_s et E_d en (GPa).

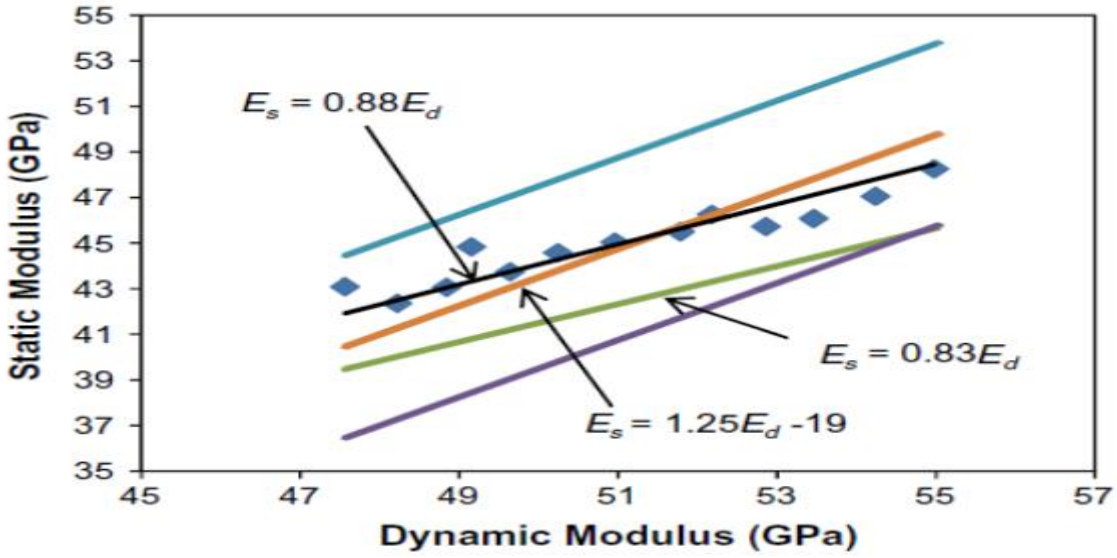

Figure 2.33 : La relation entre les modules d'élasticité statique et dynamique [MegatJohari et al., 2011]

2.7. Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression

[Demirboga et al., 2004] ont développé une relation entre la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression pour des bétons constitués d'additions minérales (cendre volante et laitier de haut fourneau) selon l'équation 2.12 suivante :

$$f_c' = 0.008e_c^{0.002\,V} \qquad (2.12)$$

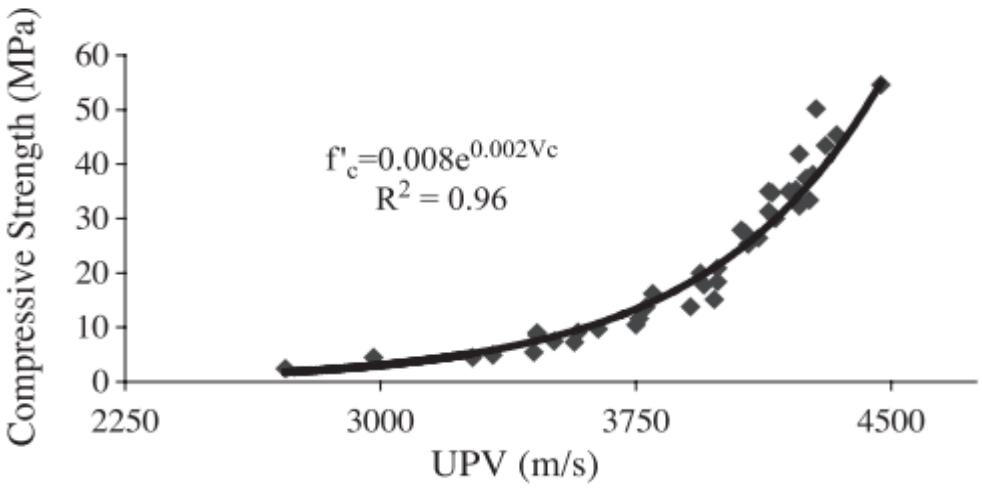

Figure 2.34 : Relation entre l'UPV et la résistance pour FA, BFS et FA + BFS [Demirboga et al., 2004]

[Ulucan et al., 2008] ont étudié l'influence des ajouts minéraux en se basant sur les travaux de Tharmaratram et al. (1990), qui ont déjà trouvé une relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression sous la forme suivante :

$$f_c' = ae^{bV_c} \qquad (2.13)$$

Les figures 2.35 et 2.36 illustrent les résultats obtenus sur des bétons auto-plaçants contenant de la cendre volante (FA) et de la fumée de silice (SF) [Ulucan et al., 2008].

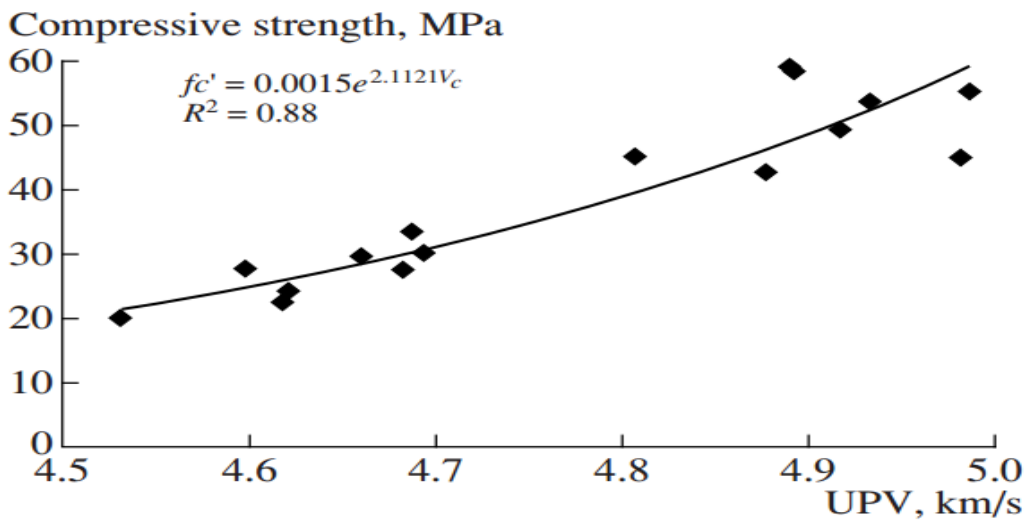

Figure 2.35 : Corrélation entre l'UPV et la résistance à la compression pour un BAP avec FA [Ulucan et al., 2008]

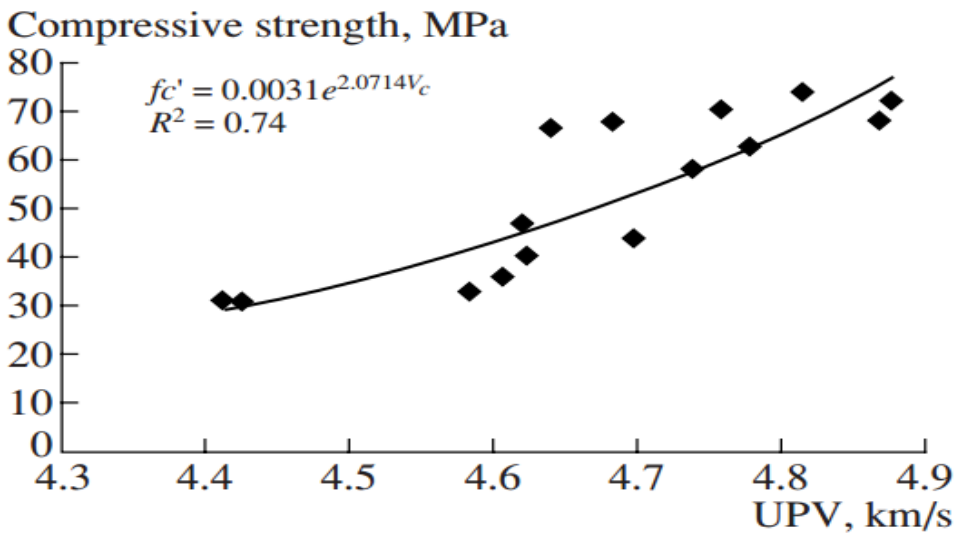

Figure 2.36 : Corrélation entre l'UPV et la résistance à la compression pour un BAP avec SF [Ulucan et al., 2008]

Les résultats de [Iqbal Khan, 2012] illustrés sur la figure 2.37, montrent une bonne corrélation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason V (km/s) et la résistance à la compression f_{cu}, elle est écrite comme suit :

$$V = 1.92 f_{cu}^{0.20} \qquad (2.14)$$

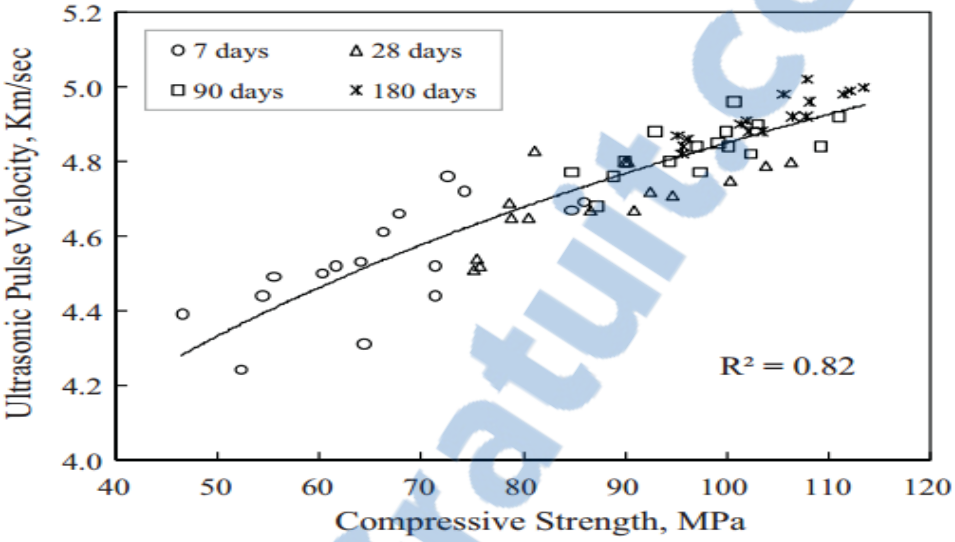

Figure 2.37 : Relation entre la vitesse de l'impulsion ultrasonique et la résistance à la compression [Iqbal Khan, 2012]

[Shariq et al., 2013] ont étudié la corrélation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression des bétons contenants différents dosages de laitier de haut fourneau (20, 40 et 60%) sur des éprouvettes cubiques et cylindriques. Les relations de type exponentiel des bétons étudiés sont regroupées dans le tableau 2.6 :

Tableau 2.6 : Les relations entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression sur les deux types d'éprouvettes de béton [Shariq et al., 2013]

Type d'éprouvette	Type de béton	équation	N°
Les éprouvettes cubiques	Béton de référence	$f_c = 0.333e^{1.065V_p}$	(2.15)
	Béton à 20 % GGBFS	$f_c = 0.23e^{1.16V_p}$ 20%	(2.16)
	Béton à 40 % GGBFS	$f_c = 0.11e^{1.13V_p}$ 40%	(2.17)
	Béton à 60 % GGBFS	$f_c = 0.195e^{1.19V_p}$ 60%	(2.18)
Les éprouvettes cylindriques	Béton de référence	$f_c' = 0.294e^{1.044V_p}$	(2.19)
	Béton à 20 % GGBFS	$f_c' = 0.199e^{1.164}$ 20%	(2.20)
	Béton à 40 % GGBFS	$f_c' = 0.1e^{1.29V_p}$ 40%	(2.21)
	Béton à 60 % GGBFS	$f_c' = 0.1755e^{1.16V_p}$ 60%	(2.22)

Où

f_c : la résistance à la compression du béton sur cube

$f_c^{'}$: la résistance à la compression du béton sur cylindre

V_p : la vitesse d'impulsion ultrasonore du béton.

2.8. Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique

[Vasconcelos et al., 2008] ont étudié l'évolution par ultrason des propriétés physiques et mécaniques des granites. Les résultats illustrés sur la figure 2.38 montrent la corrélation entre l'UPV et le module d'élasticité. Cette corrélation significative est purement linéaire (R^2 = 0,84) et l'équation correspondante est comme suit :

$$E_d = 19.87UPV_{dry} - 27813 \qquad (2.23)$$

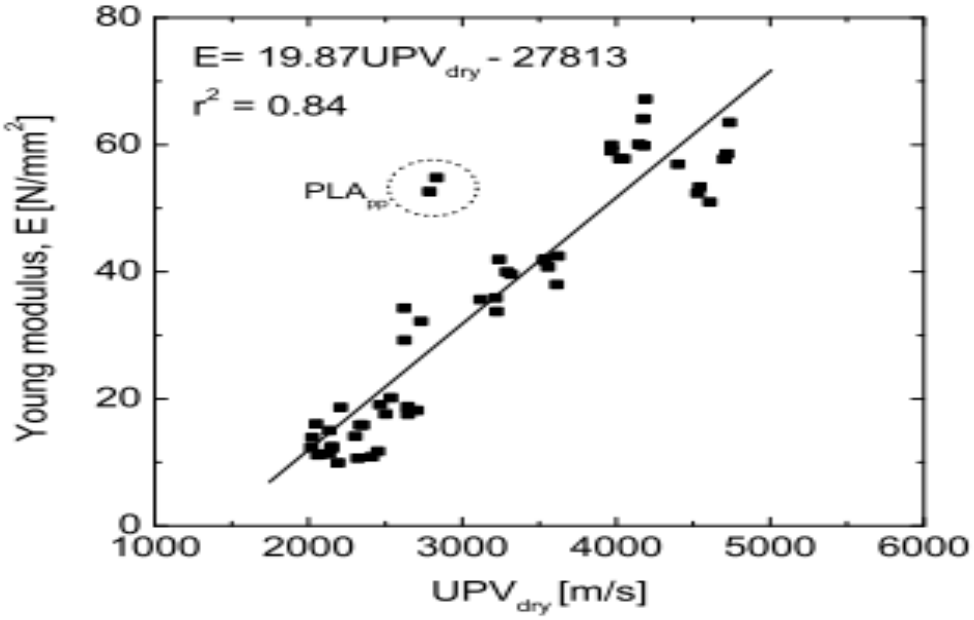

Figure 2.38 : Relation entre la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) et le module d'élasticité E_d [Vasconcelos et al., 2008]

[Cherait et al., 2006] ont étudié la relation entre le module d'élasticité dynamique E_d et l'UPV et ont trouvé l'équation suivante:

$$E_d = V^2\gamma\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \qquad (2.24)$$

Où

V : représente la vitesse des ondes (km/s)

γ : la masse volumique du béton (kg/m^3)

ν : coefficient de Poisson du béton

E_d : module d'élasticité dynamique (MPa).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

[Norambuena-Contreras et al., 2010] ont montré qu'il est possible de déterminer le module d'élasticité dynamique d'un mélange à base d'asphalte par des tests ultrasoniques. Les auteurs ont montré que la corrélation entre ces deux grandeurs est sigmoïdale (figure 2.39).

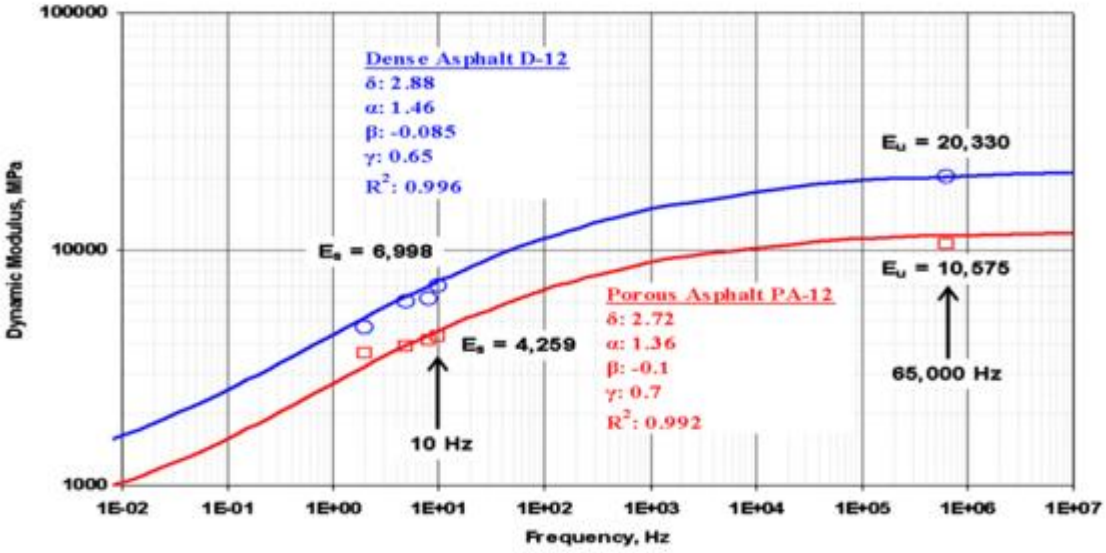

Figure 2.39 : Courbe maître des mélanges évalués à la température de 22° [Norambuena-Contreras et al., 2010]

[Iqbal Khan, 2012] a étudié la relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la module d'élasticité dynamique E_d (figure 2.40). Cette relation est ajustée par une ligne de régression exprimée par la relation 2.25 :

$$V = 0.3E_d^{0.70} \qquad (2.25)$$

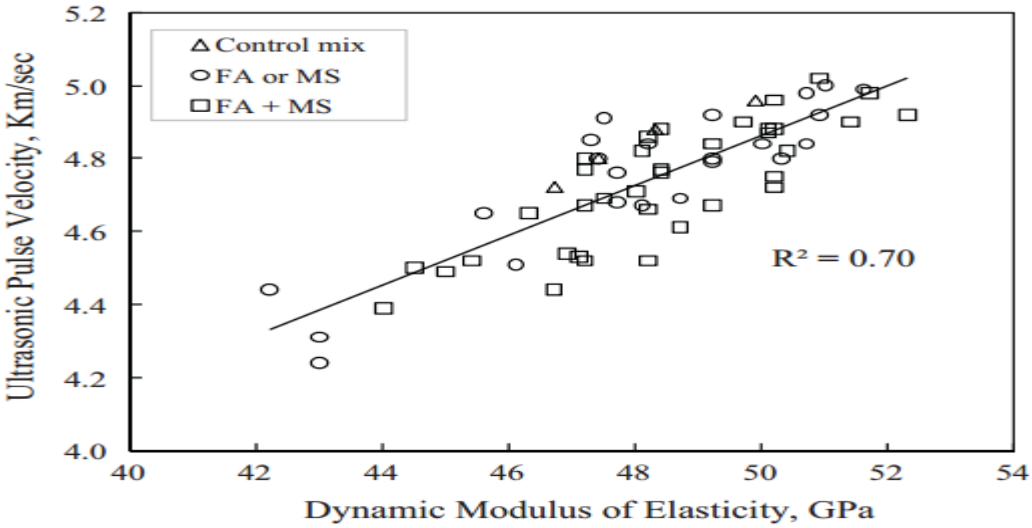

Figure 2.40 : Corrélation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason en fonction du module d'élasticité dynamique [Iqbal Khan, 2012]

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.9. Relation entre la porosité et la résistance à la compression

[Baroghel-Bouny, 2013] a évalué la durabilité « potentielle » de la porosité accessible à l'eau sur des éprouvettes de béton conservée à l'eau en fonction de la résistance à la compression. Afin d'illustrer la pertinence des classes proposées pour l'indicateur porosité accessible à l'eau et de mettre en évidence le domaine de valeurs couvert par ce paramètre, les résultats expérimentaux obtenus sur une large gamme de bétons sont présentés sur la figure 2.41 en fonction de la résistance moyenne à la compression. Les classes proposées figurent aussi sur cette même figure.

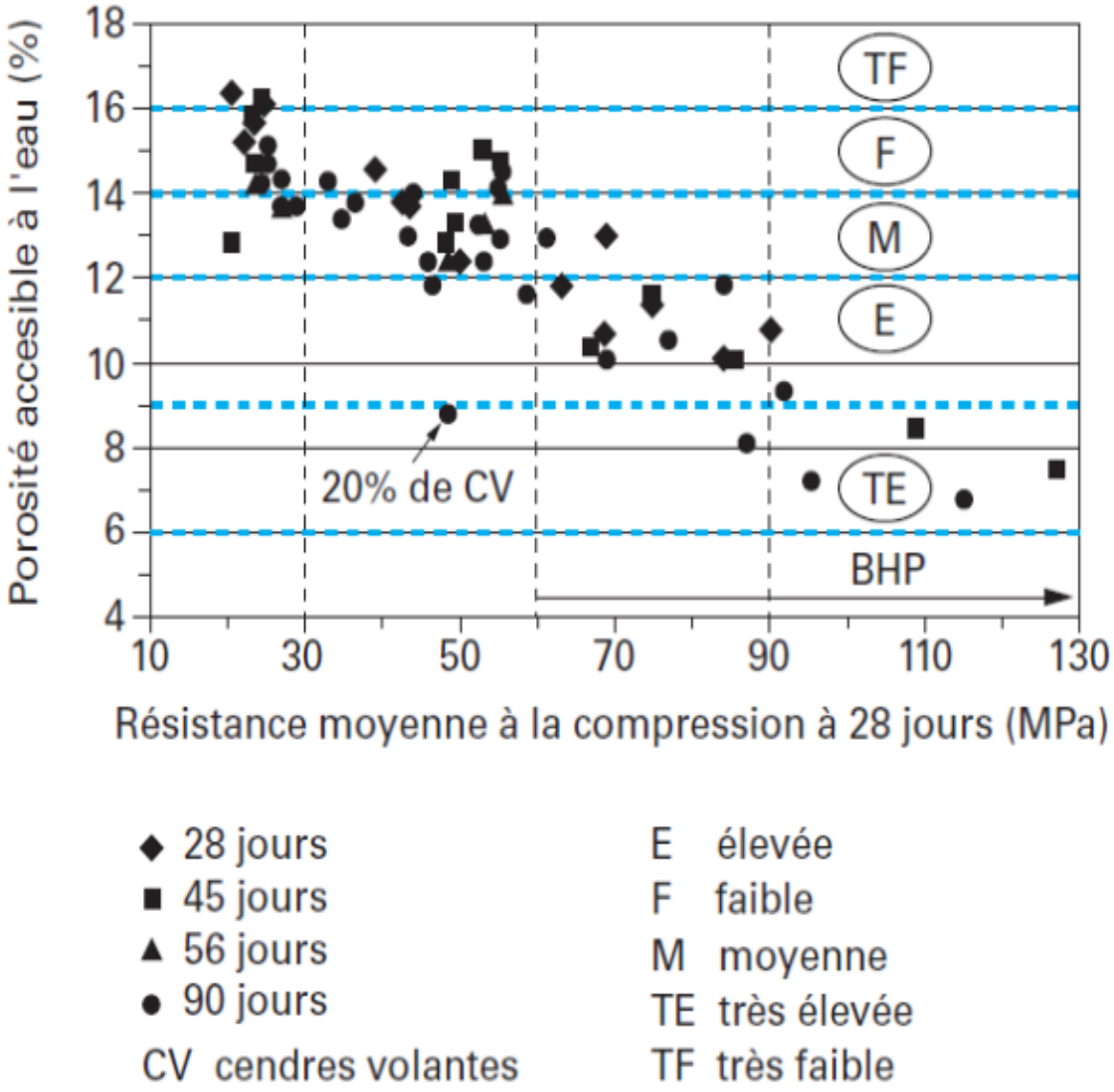

Figure 2.41 : Classes de durabilité « potentielle » et valeurs expérimentales de porosité accessible à l'eau en fonction de la résistance [Baroghel-Bouny, 2013]

[Erniatia et al., 2015] ont étudié la porosité, la taille des pores et la résistance à la compression des bétons auto-plaçants maturés à l'eau de mer. La figure 2.42 montre que la porosité et la résistance à la compression des BAP sont étroitement liées quelque soit l'âge du béton.

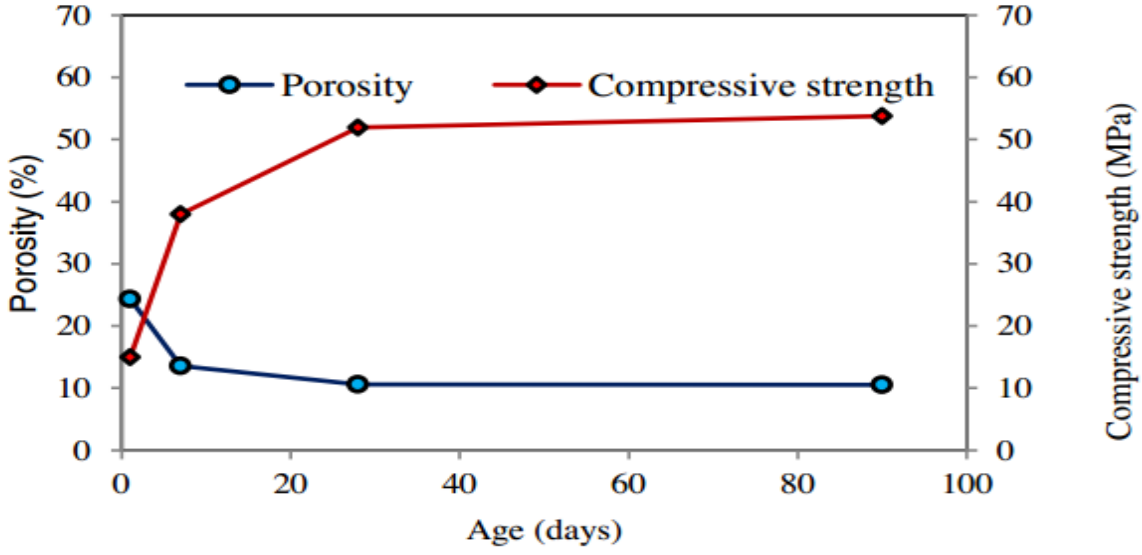

Figure 2.42 : Relation entre la porosité et la résistance à la compression en fonction de l'âge pour le BAP maturé à l'eau de mer [Erniatia et al., 2015]

Dans une autre étude comparative menée par [Erniatia et al., 2015] les auteurs ont aussi montré cette corrélation significative entre la résistance à la compression et la compacité du mélange exprimée par (1-p). Cette relation suit généralement une loi de puissance (figure 2.43).

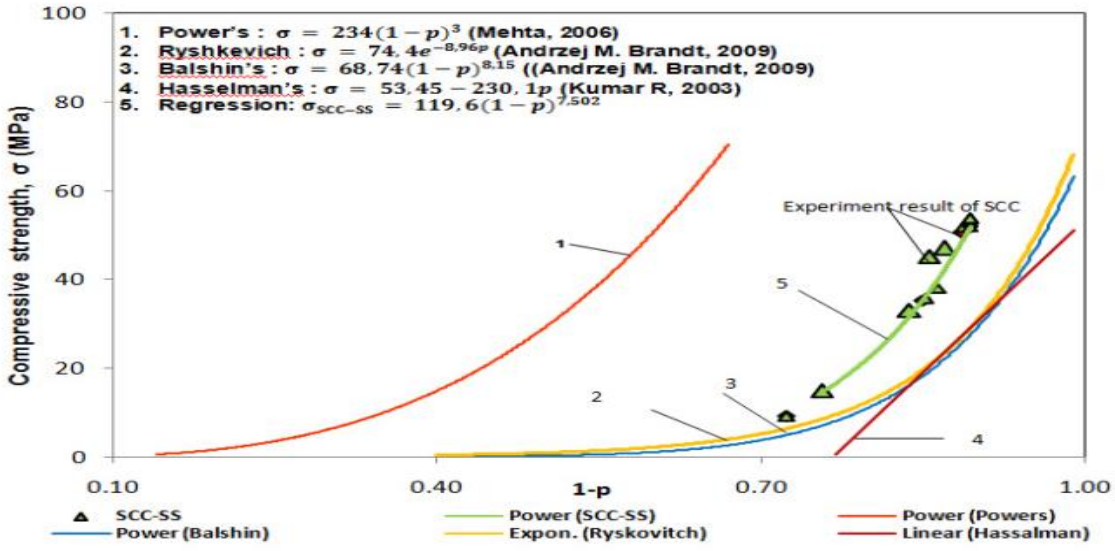

Figure 2.43 : Relation entre la résistance à la compression et la porosité du matériau à base de ciment [Erniatia et al., 2015]

2.10. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une recherche bibliographique sur les études utilisant la vitesse d'impulsion d'ultrason et la méthode de fréquence de résonance.

Il met l'accent sur la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) et la méthode de l'amplitude relative pour évaluer la résistance des différents types de bétons. L'ajout des additions minérales comme substituant au ciment influe sur le comportement mécanique du béton. L'utilisation de la fumée de silice, par sa finesse et sa réactivité a tendance à améliorer la compacité et la résistance mécanique des bétons, et donc leurs caractéristiques dynamiques. Ce n'est pas toujours le cas pour les autres additions telles que les fillers calcaires, les laitiers de haut fourneau ou la pouzzolane naturelle. Toutefois, certains résultats restent contradictoires d'où l'intérêt de notre étude.

Par ailleurs, l'étude bibliographique a fait sortir plusieurs corrélations entre les grandeurs dynamiques et mécaniques des bétons qui restent toujours sujettes à des vérifications en fonction des matériaux utilisés. La caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des différents types de mélanges ainsi que celle des bétons étudiés fera l'objet du chapitre trois suivant.

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET DES BETONS ETUDIES

3.1. Introduction…….....…….....74

3.2. Caractéristiques physico-chimiques du ciment….....…….....74

3.3. Granulats (graviers et sable)…….....……77

3.4. Additions minérales…….....81

3.5. Caractérisation des bétons étudiés……...….....81

3.6. Programme expérimental…….....83

3.7. Méthodes d'essais utilisées.....…….……88

3.8. Conclusion…….....……...…….....90

3.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, la compagne expérimentale de cette étude pour la caractérisation des matériaux utilisés et le comportement des différents types de bétons étudiés avec les différentes additions minérales. Toutefois, notre choix s'est porté sur la confection de treize (13) mélanges de bétons, un béton ordinaire sans addition, et des bétons contenant (5, 10 et 15%) de fumée de silice, (20, 40 et 60%) de laitier de haut fourneau, (10, 20 et 30%) des fillers calcaires et (10, 20 et 30%) de pouzzolane naturelle.

Dans une première phase, nous présentons les caractéristiques des ingrédients du mélange béton, les différents paramètres étudiés et la formulation des bétons utilisées. Nous effectuons en seconde phase les essais destructifs et non destructifs des différents types de bétons confectionnés sur des éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm^2, il s'agit de l'essai de la résistance à la compression, de l'essai pour la mesure de la fréquence de résonance qui va nous permettre de déterminer le module d'élasticité dynamique, le module de cisaillement et le coefficient de Poisson et de l'essai de l'ultrason pour la détermination de la vitesse d'impulsion d'ultrason. Par ailleurs, nous avons considéré les spécimens 11 x 22 cm^2 qui nous ont servis à mesurer la porosité accessible à l'eau.

3.2. Caractéristiques physico-chimiques du ciment

3.2.1. Composition chimique et minéralogique

Le ciment utilisé dans la présente étude est le CPJ CEM II / A 42.5 de la Société des Ciments de Béni-Saf appartenant à la wilaya de Ain-Temouchent ; il répond parfaitement à la norme européenne (EN197-1 2001) à base de la pouzzolane naturelle (13 à 20%), il est composé de 80% de clinker et 5% de gypse. Les détails de ces compositions, chimique et minéralogique sont présentés dans les tableaux 3.1 et 3.2 respectivement. Les analyses ont été réalisées au laboratoire de l'usine de fabrication du ciment.

Tableau 3.1 : Composition chimique du ciment (%)

S_iO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	P_2O_5	TiO_2	LOI
24.52	5.70	3.26	54.12	1.07	0.85	0.47	2.02	0.16	0.41	2.60

Tableau 3.2 : Composition de Bogue minéralogique du ciment (%)

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
56.71	21.06	4.45	12.01

3.2.2. Caractéristiques physico – mécaniques

3.2.2.1. Surface spécifique

La finesse d'un ciment peut être caractérisée par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une unité de masse exprimée en m²/kg de poudre ou (cm^2/g). L'étude de la finesse ou surface spécifique du ciment est d'autant plus nécessaire puisqu'elle a une influence directe sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du mortier et du béton. Elle est calculée en fonction du temps au moyen de l'appareil de Blaine ou «perméabilimètre de Blaine» [NF EN 196-6, 1990] (figure 3.1), elle est de 3670 cm^2/g.

Figure 3.1 : Perméabilimètre de Blaine Manuel

3.2.2.2. Essai de consistance

Le but de cet essai est de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance désirée pour un ciment CPJ CEM II/A 42.5. Cette dernière a été mesurée par l'appareil Vicat conformément aux prescriptions de la norme [NF EN 196-3, 2006]. A l'aide d'une aiguille circulaire de 1.13$\pm$0.05 mm de diamètre et sous l'effet d'un poids prédéterminé, cette aiguille est utilisée pour pénétrer dans une pâte de consistance normalisée placée dans un moule spécial (figure 3.2). Les résultats de la consistance sont résumés dans le tableau 3.3.

3.2.2.3. Essai de prise

L'essai consiste à suivre l'évolution de la résistance d'une pate normalisée, conformément à la norme NF EN 196-3, l'appareil utilisé est l'appareil de VICAT (figure 3.2). Quand sous l'effet d'une charge de 300g l'aiguille s'arrête à une distance d du fond du moule telle que d= 5$\pm$1 mm on dit que le début de prise est atteint. Le début de prise correspond au temps écoulé depuis l'ajout de l'eau au ciment. Le temps de fin prise est détermine au cours de l'essai, lorsque le

cercle de l'aiguille ne laisse pas de trace sur la surface de la pâte de ciment. Ces temps sont indiqués sur le tableau 3.3.

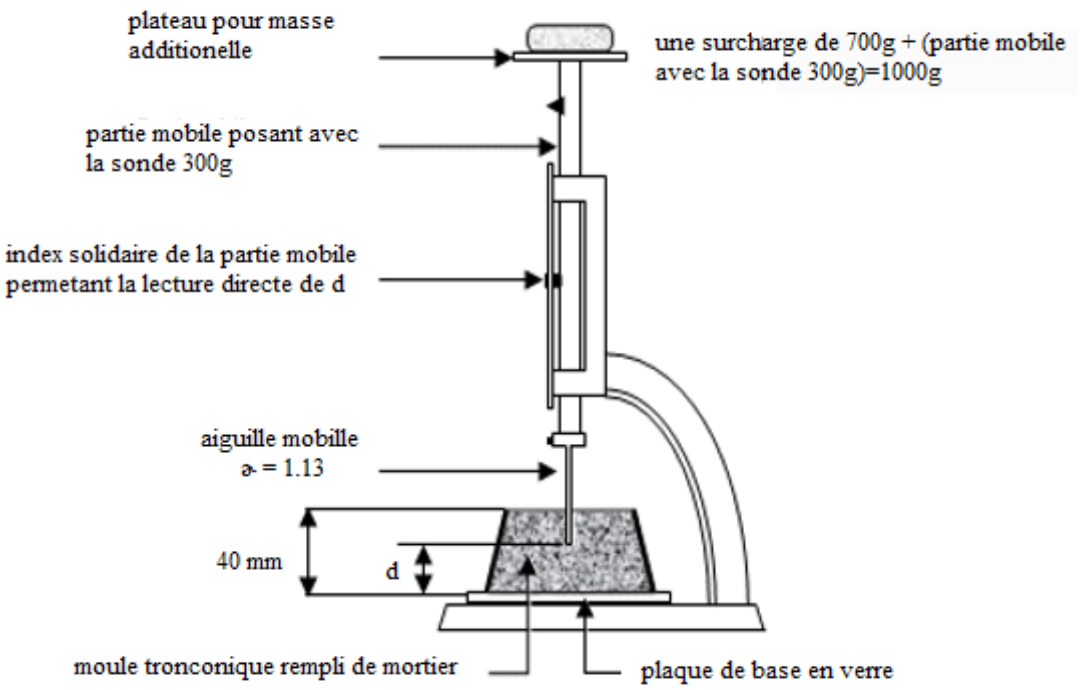

Figure 3.2 : Appareil de Vicat utilisé pour la mesure de la consistance et du temps de prise nécessaire du ciment

3.2.2.4. Masses volumiques (apparente et absolue)

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme NF P 18-558. Nous avons utilisé deux méthodes pour le calcul de la masse volumique absolue : la méthode du densitomètre « Le Chatelier » ainsi que celle du pycnomètre à liquide. Les valeurs des masses volumiques (apparente et absolue) du ciment utilisé, sont inclues dans l'intervalle imposé par la norme NA 231, comprises entre [900 – 1100] kg/m^3 pour la masse volumique apparente et [2900 – 3150] kg/m^3 pour la masse volumique absolue. Les résultats des masses volumiques apparente et absolue sont récapitulés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques du ciment

Consistance (%)	28
Début de prise (min)	130
Fin de prise (min)	334
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1030
Masse volumique absolue (kg/m^3)	3060

3.2.2.5. Essais mécaniques sur les mortiers normalisés

Les essais mécaniques sont effectués sur trois éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16 cm^3 de mortier normalisé, conformément à la norme [NF EN 196-1, 2006] pour les échéances de (2, 7 et 28 jours). La machine qui a été utilisée pour cet essai est un portique universel didactique controlab avec les caractéristiques suivantes :

- un cadre métallique avec différents perçages ;
- un vérin hydraulique d'une capacité de 160 KN ;
- la mise en charge de 2400 N/s ± 200 N/s, en flexion et en traction à une échelle de 10 KN ;
- une vitesse de mise en charge de 50 N/s ± 10N/s.

Les résultats obtenus, concernant les essais mécaniques, sont résumés dans le tableau 3.4, et sont conformes aux exigences de la norme EN 196-1.

Tableau 3.4 : Caractéristiques mécaniques du ciment

Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la flexion (MPa)		
2 jours	7 jours	28 jours	2 jours	7 jours	28 jours
17.30	33.10	49.80	3.85	5.87	7.25

3.3. Granulats (graviers et sable)

Les granulats occupent pratiquement les trois quarts du volume du béton. Il n'est pas étonnant que leurs qualités influent significativement sur les caractérisations du béton. Selon leurs propriétés, les granulats peuvent limiter la résistance du béton et affecter la durabilité et les performances structurales du béton. Autrement dit, on ne peut confectionner un béton résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres.

Pour pouvoir réaliser notre étude et assurer une bonne qualité des bétons, nous avons choisi d'utiliser les agrégats locaux de la carrière de Djebel Abiod de la région de Tlemcen, située à Sidi Abdelli appartenant à l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Ces granulats calcaires concassés sont commercialisés en tant que classes granulaires : sable 0/4 et gravillons de classes 4/8, 8/16 et 16/25.

3.3.1. Site de la carrière Djebel Abiod

La carrière Djebel Abiod appartient à l'ENG et se situe à 28 km au Nord-Est de la ville de Tlemcen sur la route nationale N°53 et à 4 km au sud de la localité de Sidi-Abdelli qui recèle des réserves importantes (figure 3.3). Les coordonnées Lambert sont : X = 149450 ; Y = 199500.

Rapport-Gratuit.com

Figure 3.3 : Plan de situation du gisement de Djebel Abiod

3.3.2. Morphologie du gisement

Le gisement s'intègre dans une région plus ou moins montagneuse, constituée dans son ensemble par des roches du Kimméridgien inférieur du Jurassique supérieur. Dans le contour du gisement sont inclues les roches massives, compactes, dures, légèrement karstifiées (figure 3.4). Le taux de karsts au sein du contour des réserves est égal à 5.5%. Ce gisement est à prédominance de calcaires gris, pélitomorphes massifs, compacts à intercalation de calcaires dolomitiques [Boukli Hacene, 2010].

Figure 3.4 : Morphologie du gisement de la carriére de Djebel Abiod

3.3.3. Mode d'extraction

L'extraction de la roche se fait au moyen d'une substance explosive considérée comme source principale d'abattage. Elle englobe les étapes suivantes : le forage, la mine, la charge, le transport et le concassage des blocs jusqu'à l'obtention des morceaux de dimensions nécessaires et admissibles (figure 3.5).

Figure 3.5 : Mode d'extraction des granulats

3.3.4. Capacité de production

Les réserves du gisement s'élèvent à 51 125 169 tonnes. Compte tenu des pertes d'exploitation (5 %) et des pertes de traitement (10 %), il est possible d'en fabriquer 43 456 394 tonnes d'agrégats (figure 3.6). Donc, les réserves sont suffisantes pour assurer l'alimentation d'un concasseur ayant une capacité annuelle de production de 500 000 tonnes pendant 86,9 ans [Boukli Hacene, 2010].

Figure 3.6 : Différents produits de la carrière

3.3.5. *Identification des granulats*

3.3.5.1. Analyse granulométrique

Dans tous les mélanges de bétons considérés dans cette étude, nous avons utilisé les quatre classes granulaires, leurs analyses granulométriques ont été faites conformément à la norme EN 933-1 et les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3.7. Le sable à un module de finesse de 3 (tableau 3.5) cette valeur répond à la norme Afnor P 18- 541 et appartient à l'intervalle [1.8-3.2], un taux de fines de 12% inférieure à 20% et un équivalent de sable de 82.5% c'est-à-dire, un sable propre et qui répond à la norme NF P 18-541.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

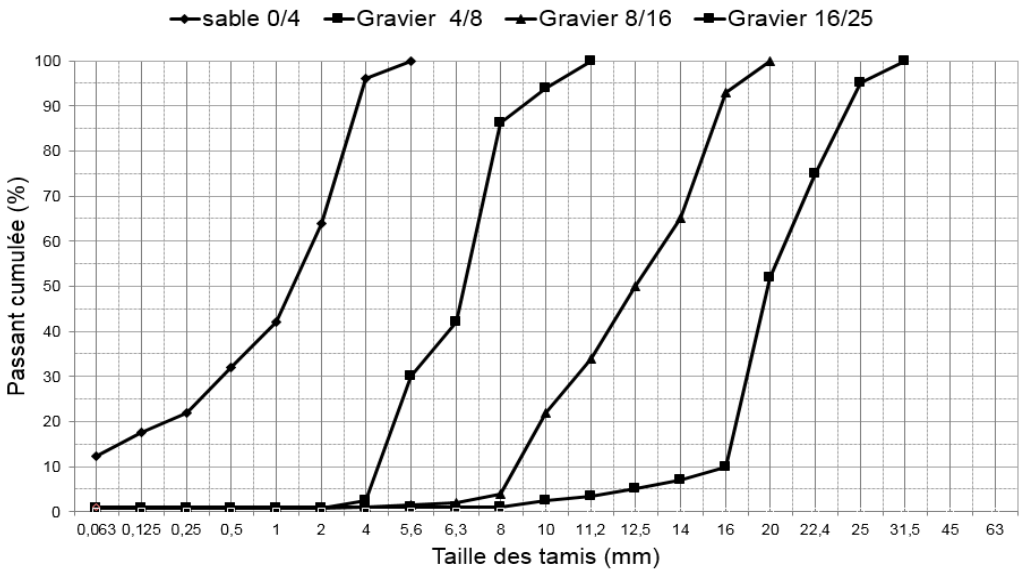

Figure 3.7 : Courbes granulométriques des granulats

3.3.5.2. Masses volumiques apparentes et absolues

Les masses volumiques apparentes et absolues des graviers ont été déterminé conformément à la norme P 18-541. Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer la masse absolue des graviers : la méthode de l'éprouvette graduée et la méthode du ballon.

Les résultats des masses volumiques obtenus pour les différents graviers, sont récapitulés sur le tableau 3.5. Les valeurs des masses volumiques (apparente et absolue) des granulats répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620. La masse volumique apparente est comprise entre [1300-1600] kg/m^3 et la masse volumique absolue est comprise entre [2500 - 2700] kg/m^3.

Tableau 3.5 : Caractérisation des granulats

Désignation des essais	Fractions testées	Résultats obtenus
Equivalent de sable (%)	Sable 0/4	82.5
Masse volumique absolue (kg/m^3) (NF EN 12620)	Gravier 16/25 Gravier 8/16 Gravier 4/8 Sable 0/4	2560 2600 2650 2590
Masse volumique apparente (kg/m^3) (NF EN 12620)	Gravier 16/25 Gravier 8/16 Gravier 4/8 Sable 0/4	1360 1350 1350 1520
Module de finesse (NF P 18 597)	Sable 0/4	3
Teneur en fines (%) (NF P 18 597)	Sable 0/4	12

3.4. Additions minérales

La fumée de silice (FS) utilisée dans cette étude provient de la société TEKNACHEM Algérie, quand au laitier de haut fourneau (LHF) provient de la cimenterie de M'sila. Les fillers calcaires (FC) utilisées proviennent de la carrière de Djebel Abiod de Sidi Abdelli de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG), ils résultent du processus de concassage et de broyage des roches calcaires. La pouzzolane naturelle (PN) utilisée est d'origine volcanique et provient de la Société des Ciments de Béni-Saf appartenant à la wilaya d'Ain-Temouchent.

Les caractéristiques physico-chimiques des différentes poudres utilisées sont présentées dans le tableau 3.6.

La fumée de silice (SF), le laitier de haut fourneau (LHF), les fillers calcaires (FC) et la pouzzolane naturelle (PN) utilisés dans cette étude ont respectivement une surface spécifique de 220000 cm^2/g, 4000 cm^2/g, 3200 cm^2/g et 4060 cm^2/g.

Tableau 3.6 : Les caractéristiques physico-chimiques des différentes poudres utilisées

	Composé Chimique	Matériaux cimentaires (%)			
		FS	LHF	FC	PN
Composition Chimique	SiO_2	95	38,3	0,06	37,84
	Al_2O_3	0.5	8,81	0,29	14,74
	Fe_2O_3	1	0,98	0,22	14,1
	CaO	0.5	39,63	52,63	5,34
	MgO	1	5,54	0,84	3,03
	SO_3	0	1.35	0.02	0,25
	K_2O	-	0.59	0.01	0,73
	Na_2O	0	0.13	0.08	0,75
	Cl	0.004	0.004	0.005	0.05
	P_2O_5	-	0,1	0.02	0,68
	TiO_2	1	0,42	0.02	3.37
	LOI	0	1	42.77	4.57
Propriétés Physiques	Densité absolue	2.2	2.86	2.700	2.660
	Surface spécifique (cm^2/g)	220000	4000	3200	4060

3.5. Caractérisation des bétons étudiés

Les bétons étudiés ont été formulés dans un premier temps par la méthode de Dreux-Gorisse, puis optimisés en utilisant la méthode Baron-Lesage [Boukli Hacene, 2010].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

3.5.1. Méthode de Dreux-Gorisse

Cette méthode est de nature fondamentalement empirique, à la différence de la méthode de Faury qui elle est antérieure [Faury et al., 1942] et qui est basée sur la théorie de l'optimum granulaire de Caquot [Caquot, 1937]. Dreux a mené une large enquête pour recueillir des données sur des bétons satisfaisants [de Larrard, 2000]. Sur la base d'une analyse statistique de ce grand nombre de bétons et en combinant les courbes granulaires obtenues, ils ont pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulaire de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme semi logarithmique (figure 3.8).

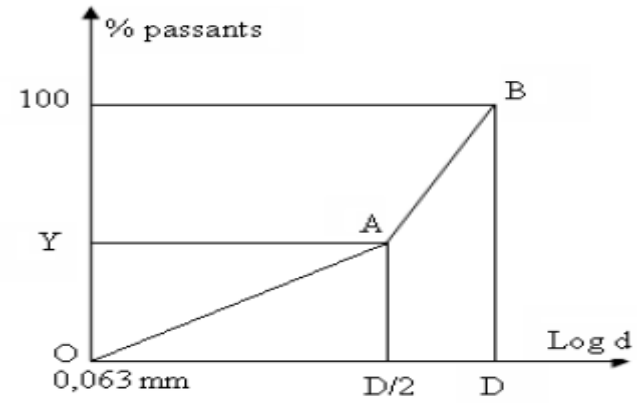

Figure 3. 8 : Courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse

3.5.2. Méthode de Baron Lesage

Cette méthode n'est pas en soi une méthode de formulation, mais plus une technique pour optimiser le squelette granulaire d'un béton [Baron et al., 1976]. L'essai utilisé pour caractériser la maniabilité est le maniabilimètre LCL (ou essai d'écoulement) [Baron et al., 1969]. Le principe est de mesurer le temps mis par un échantillon de béton pour s'écouler sous vibration jusqu'à un certain repère. Les proportions optimales des granulats sont supposées donner le temps d'écoulement minimum, pour une quantité donnée de ciment et d'eau. Une fois les proportions granulaires repérées, les dosages en eau et ciment sont ajustés expérimentalement, de sorte que le mélange présente la maniabilité et la résistance souhaitées. On suppose, dans cette méthode, que les proportions optimales de granulats ne dépendent pas de la quantité de ciment.

La méthode de Baron Lesage a l'avantage de ne dépendre d'aucune formule ou table qui pourrait être suspectée de ne s'appliquer qu'à certains types de matériaux. De ce point de vue, elle peut être qualifiée de fondamentale et de scientifique. Par contre, la nécessité de réaliser un certain nombre de gâchées expérimentales, pour trouver les proportions optimales de granulat, est assez contraignante. La méthode devient surtout lourde quand plus de deux granulats doivent être proportionnés [de Larrard, 2000].

3.6. Programme expérimental

Un béton de référence (RC) caractérisé par une optimisation des squelettes granulaires (Boukli Hacene, 2010) et douze (12) mélanges ont été étudiés et présentés dans le tableau 3.7. Le dosage du liant a été fixée à 350 kg/m^3 avec un rapport eau sur poudre égal à 0,5 (E/P = 0,5) pour tous les mélanges. Par ailleurs, les substitutions massiques du ciment par la fumée de silice sont 5, 10 et 15% celles du laitier sont 20, 40 et 60%, et celles des fillers calcaires et de la pouzzolane naturelle sont 10, 20 et 30% respectivement.

Tableau 3.7 : Différents types de bétons

Type de mélange	Ciment CPJ CEM II/A 42,5 kg/m^3	Additions minérales kg/m^3	Gravier 16-25 kg/m^3	Gravier 8-16 kg/m^3	Gravier 4-8 kg/m^3	Sable 0-4 kg/m^3	Eau litre
Béton de référence	350	-	533	432	144	660	175
FS5	332.5	17.5	533	432	144	660	175
FS10	315	35					
FS15	297.5	52.5					
LHF20	280	70					
LHF40	210	140					
LHF60	140	210					
FC10	315	35					
FC20	270	80					
FC30	245	105					
PN10	315	35					
PN20	270	80					
PN30	245	105					

234 éprouvettes cylindriques 16x32 cm^2 ont été réalisées pour la détermination de la fréquence de résonnance, la vitesse d'impulsion d'ultrason a différentes échéances (1, 3, 7, 14, 28, 56, 90 et 180 jours) et la résistance à la compression aux échéances (3, 7, 28, 56, 90 et 180 jours), ainsi que 13 éprouvettes cylindriques 11x22 cm^2 ont servi pour la mesure de la porosité aux échéances (28, 56 et 90 jours).

3.6.1. Essais sur bétons

Deux familles d'essais sont réalisées pour caractériser nos mélanges ; l'essai à l'état frais pour évaluer l'ouvrabilité de nos bétons et les essais à l'état durci pour déterminer leurs performances dynamiques et mécaniques.

3.6.1.1. Essais réalisées sur le béton à l'état frais

3.6.1.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre. Il est utilisable tant que la dimension maximal des granulats ne dépasse pas 40 mm selon la norme NF P 18-451. Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône sous l'effet de son poids propre (figure 3.9). Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

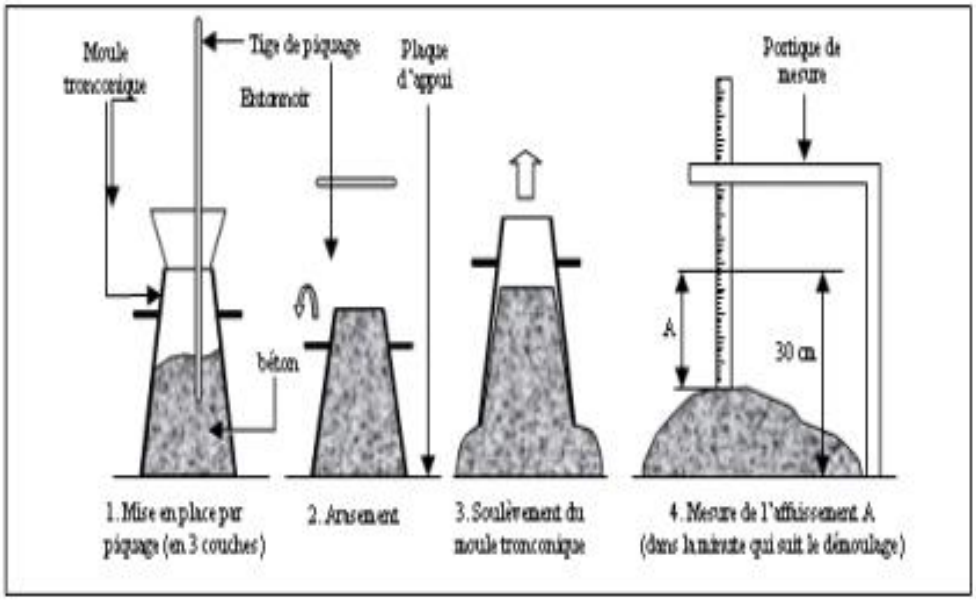

Figure 3.9 : Test d'affaissement

3.6.1.1.2. Malaxage et confection des éprouvettes

Le mélange des différents constituants a été effectué conformément à la norme NF P 18-404 ; les matériaux (ciment, sable, gravillons et eau) sont pesés et placés près du malaxeur. Le remplissage du malaxeur se fait dans l'ordre suivant : graviers – ciment – sable – Eau.

- l'eau étant rajoutée après 01 minute de malaxage à sec
- le malaxage de l'ensemble est poursuivi pendant 02 minutes.

La vibration du béton dépend de son ouvrabilité :

- Au-delà d'une ouvrabilité de 10 cm (figure 3.10), le béton se met en place en deux couches d'égale importance par piquage conformément à la norme NF P 18-423.
- Lorsque l'affaissement mesuré est inférieur à 10, la mise en place du béton s'effectue en deux couches et nécessite une vibration (figure 3.11) conformément à la norme NF P 18-422.

Figure 3. 10 : Essai d'affaissement au Cône d'Abrams sur le béton étudié

Figure 3.11 : Confection et vibration des éprouvettes 16x32 cm^2de béton

L'éprouvette est arasée en deux phases. Une phase de dégrossissage consiste à passer un réglé sur le plat de son biseau. Une phase d'affinage consiste à passer le réglé sur le plat (figure 3.12).

Figure 3.12 : Arasement d'une surface d'éprouvette 16x32cm^2

La procédure de maturation des éprouvettes de béton est faite en immersion totale dans un bassin à une température ambiante de 20°C±2°C (figure 3.13), conformément à la norme NA 426.

Figure 3.13 : Conservation des éprouvettes (bassin d'eau normalisée)

3.6.1.2. Essais réalisées sur le béton à l'état durcis

3.6.1.2.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée conformément à la norme ASTM C39 [ASTM C39-12, 2013] sur trois éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm^2 pour chaque mélange. Pour cela, nous avons utilisé une presse universelle d'une capacité de 2000 KN avec une précision de 0.5 MPa (figure 3.14). Ces éprouvettes ont été préalablement surfacées afin d'assurer une bonne planéité ainsi qu'une perpendicularité des faces de chargements par apport aux génératrices du cylindre (figure 3.15).

Figure 3.14 : Une presse hydraulique

Figure 3.15 : Rectifieuse (surfaçage des éprouvettes)

3.6.1.2.2. Porosité accessible à l'eau

Plusieurs disques cylindriques de 5 cm d'épaisseur et de 11 cm de diamètre ont été préparés pour évaluer la porosité à des échéances de 28, 56 et 90, avec la procédure recommandée par AFPC [AFPC-AFREM, 1997].

L'essai commence par un séchage des échantillons dans une étuve à température (65 ± 5 °C) jusqu'à stabilisation de la masse (M_{dry}). Ces disques sont ensuite ressaturées sous vide pendant 24 heures pour obtenir la masse (M_{sat}) (figure 3.16). La porosité peut donc être calculée par la relation suivante

$$P = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{hyd}} \qquad (3.1)$$

Figure 3. 16 : Dispositif de la porosité accessible à l'eau

3.7. Méthodes d'essais utilisées

3.7.1. La vitesse d'impulsion d'ultrason

Cet essai permet le contrôle de la qualité des matériaux et d'estimer les propriétés mécaniques du béton depuis de nombreuses années. La technique a comme but de vérifier l'homogénéité du béton, la durabilité et d'identifier des défauts ou des vides. C'est une méthode basée sur la vitesse de propagation des ondes élastiques dans un matériau. Aussi, l'essai permet d'estimer la résistance à la compression, le module d'élasticité du béton et le coefficient de Poisson.

La vitesse d'impulsion d'ultrason (UPV) est déterminée à l'aide d'un essai non destructif décrit par la norme ASTM [ASTM C597, 2003] qui est spécialement utilisé pour tester et contrôler la qualité du béton dans le domaine de la construction (figure 1.7).

L'essai consiste à mesurer le temps de passage des vibrations longitudinales générées par l'appareil qui traversent le matériau sur une longueur donnée entre les transducteurs pour obtenir la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques (figure 3.17).

Figure 3.17 : Essai de la vitesse d'impulsion d'ultrason sur une éprouvette de béton

3.7.1.1. Appareillage et méthodologie

Dans notre étude nous avons utilisé un appareil qui s'appelle le PunditLab. C'est un instrument utilisé pour la mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonore (UPV) qui sert à examiner la qualité du béton. Il dispose d'une acquisition de données en ligne, d'une analyse de forme d'onde et d'une télécommande complète de tous les paramètres de transmission.

L'appareil PunditLab est composé : d'une unité d'affichage, de 2 câbles BNC de 1,5 m, d'une tige d'étalonnage de 25 µs, de 4 piles AA (LR6), de 2 transducteurs (émetteur et récepteur de 54 kHz), de couplant, de chargeur USB avec câble USB et de support de données avec logiciel comme indiqué sur la figure 3.18.

Figure 3.18 : PunditLab, testeur de béton à vitesse d'impulsion ultrasonique

3.7.2. Propriétés dynamiques

3.7.2.1. Appareillage

L'appareil d'essai se compose principalement de deux sections, l'une génère des vibrations mécaniques et l'autre détecte ces vibrations.

Le module d'élasticité dynamique (E_d) est déduit à partir de la fréquence de résonance déterminée à l'aide d'un essai non destructive décrit par la norme ASTM [ASTMC215-02 2003]. Cet essai consiste à placer un émetteur et un récepteur sur les deux extrémités d'une éprouvette cylindrique 16 x 32 cm^2 de manière à générer des vibrations longitudinales parallèles à l'axe principal comme illustré sur la figure 1.21. Les amplitudes peuvent être mesurées à l'aide d'un oscilloscope. Les équations (1.19), (1.31) et (1.33) sont utilisées pour calculer E_d, G_d et μ respectivement.

3.7.3. Module d'élasticité statique

Le test statique a été réalisé à l'aide d'une machine hydraulique universelle de capacité 600KN appartenant au laboratoire de Génie Civil de l'Université de Tlemcen (figure 3.19). Les mesures des modules d'élasticité statiques à 7 et 28 jours ont été réalisées sur des éprouvettes

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

cylindriques en béton 16x32 cm^2. Trois échantillons ont été testés à chaque âge de l'essai et ceci pour les différents types de bétons réalisés.

Figure 3.19 : Machine hydraulique universelle

3.8. Conclusion

Les résultats des analyses chimiques et minéralogiques et des essais physiques sur le ciment ainsi que ceux des caractéristiques des granulats et des différentes poudres utilisées obtenus sont conformes aux exigences des normes respectifs NF EN 196-3 pour le ciment et la norme P 18-541 pour les granulats et nous donnent une idée générale sur les caractéristiques des matériaux utilisés qui vont nous aider d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux réalisés.

Dans le chapitre quatre suivant, nous allons présenter les résultats obtenus.

CHAPITRE 4

PRESENTATION ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

4.1. Introduction.....92

4.2. Résultats et discussion 92

4.2.1. Influence des additions sur le module d'élasticité dynamique 92

4.2.2. Influence des additions sur le module de rigidité dynamique ..... …...94

4.2.3. Influence des additions sur le coefficient de Poisson……..96

4.2.4. Influence des additions sur la résistance à la compression 98

4.2.5. Influence des additions sur la vitesse d'impulsion d'ultrason…..……...101

4.2.6. Effet des additions minérales sur l'évolution de La porosité……....…….....103

4.2.7. Relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression.....105

4.2.8. Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique.....106

4.2.9. Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression……...……107

4.2.10. Relation entre le module d'élasticité statique et le module d'élasticité dynamique.....108

4.2.11. Relation entre la porosité el la résistance à la compression……....……109

4.3. Conclusion ..... …110

4.1. Introduction

L'objectif de ce travail est de déterminer les propriétés dynamique, mécanique et de durabilité du béton par l'utilisation des essais non destructifs : l'ultrason (UPV), la fréquence de résonance et des essais destructifs : la résistance à la compression. Dans ce chapitre, nous allons présenter l'analyse des différents résultats relatifs aux propriétés mécaniques des bétons étudiés ainsi que ceux de la porosité accessible à l'eau qui reste un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et prévision de la durabilité. A cet effet, nous envisageons d'obtenir des corrélations qui existent entre :

- le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression ;
- la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique ;
- la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression ;
- le module d'élasticité dynamique et le module d'élasticité statique ;
- la porosité et la résistance à la compression.

4.2. Résultats et discussion

4.2.1. Influence des additions sur le module d'élasticité dynamique

L'effet de la fumée de silice, du laitier de haut fourneau, des fillers calcaires et de la pouzzolane naturelle sur l'évolution du module d'élasticité dynamique en fonction du temps est clairement illustré aux figures 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4 respectivement pour les différents mélanges de béton.

Tous les modules d'élasticité dynamique obtenus pour les mélanges de béton avec la FS sont supérieurs à ceux du béton de référence, béton avec LHF, FL et PN et ce si pendant toute la période de durcissement. Cette tendance est due au fait que la fumée de silice est un matériau pouzzolanique, mais aussi parce qu'elle a une très grande finesse (tableau 3.6) et contient une grande quantité de dioxyde de silicium amorphe [Sharma et al., 2016]. Il est important de noter que le module d'élasticité dynamique des bétons à base de la fumée de silice augmente considérablement avec l'âge, ce qui n'est pas le cas pour les bétons à base de LHF. La teneur optimale en fumée de silice est de 10%.

On constate toutefois le contraire avec les mélanges de béton avec le LHF, où les modules d'élasticité dynamique obtenus sont inférieurs à ceux du béton de référence et ce si pendant toute la période de durcissement. Cela est probablement dû à la faible chaleur d'hydratation des laitiers [Özbay et al., 2016] et à la faible réaction pouzzolanique qui se produit [Shariq et al., 2013].

En outre, nous remarquons que l'augmentation du pourcentage (%) des additions minérales dans les bétons à tendance à augmenter le module d'élasticité dynamique, sauf pour le mélange de 60% de LHF et 30% de PN. Une telle tendance peut probablement s'expliquer par le fait que la substitution du ciment par des additions conduit à des pâtes à plus grande compacité [Lothenbah et al., 2008].

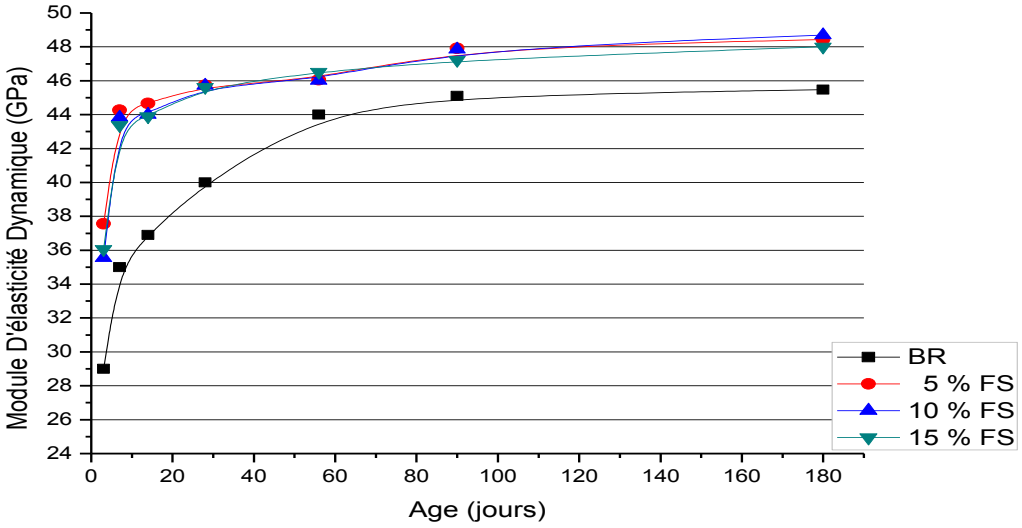

Figure 4.1 : Influence de la fumée de silice sur le module d'élasticité dynamique E_d

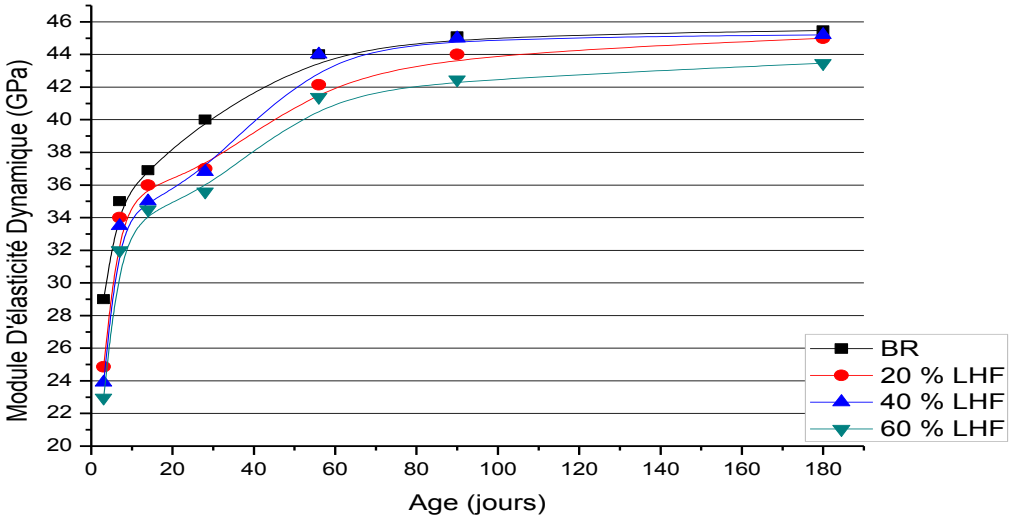

Figure 4.2 : Influence du laitier de haut fourneau sur le module d'élasticité dynamique E_d

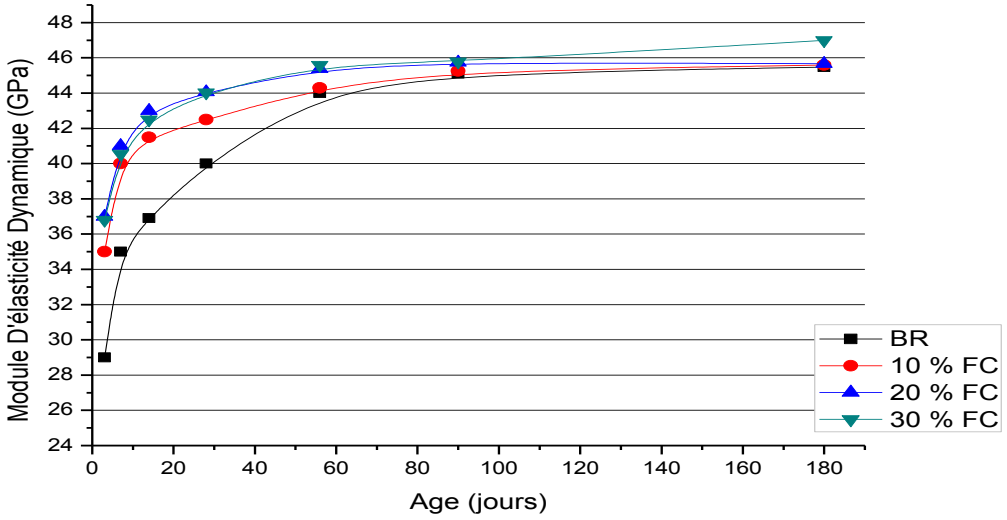

Figure 4.3 : Influence des fillers calcaires sur le module d'élasticité dynamique E_d

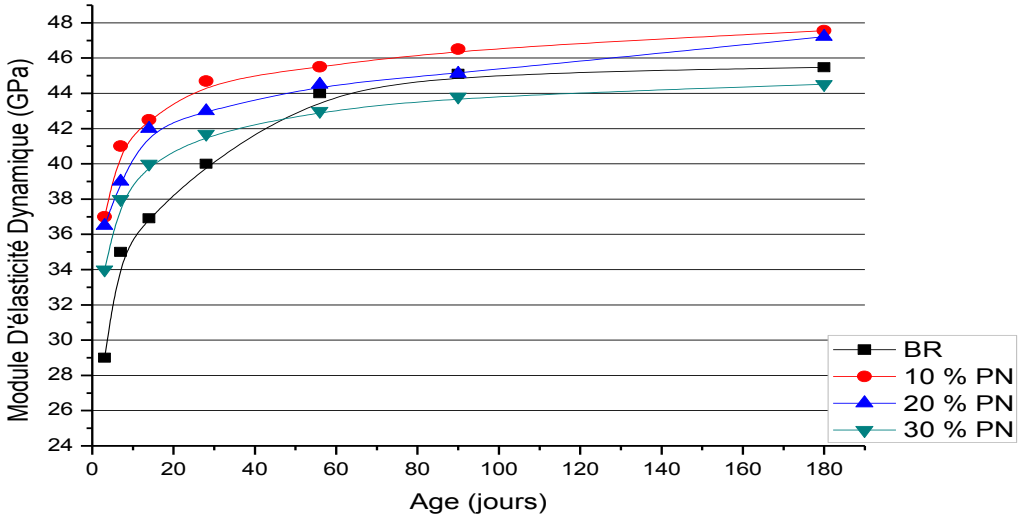

Figure 4.4 : Influence de la pouzzolane naturelle sur le module d'élasticité dynamique E_d

4.2.2. Influence des additions sur le module de rigidité dynamique

L'influence de la fumée de silice, du laitier de haut fourneau, des fillers calcaires et de la pouzzolane naturelle sur l'évolution du module de rigidité dynamique en fonction du temps est clairement présentée sur les figures 4.5, 4.6, 4.7 et 4.8 pour les différents mélanges de béton.

Les résultats du module de rigidité dynamique G_d sont similaires à ceux du module d'élasticité dynamique E_d. Les lignes de tendance donnent un grand nuage de points, ce qui peut se justifier par des coefficients de détermination R^2 qui dépassent 0,9. Nous constatons que les valeurs de G_d sont presque de moitié par rapport à celles de E_d.

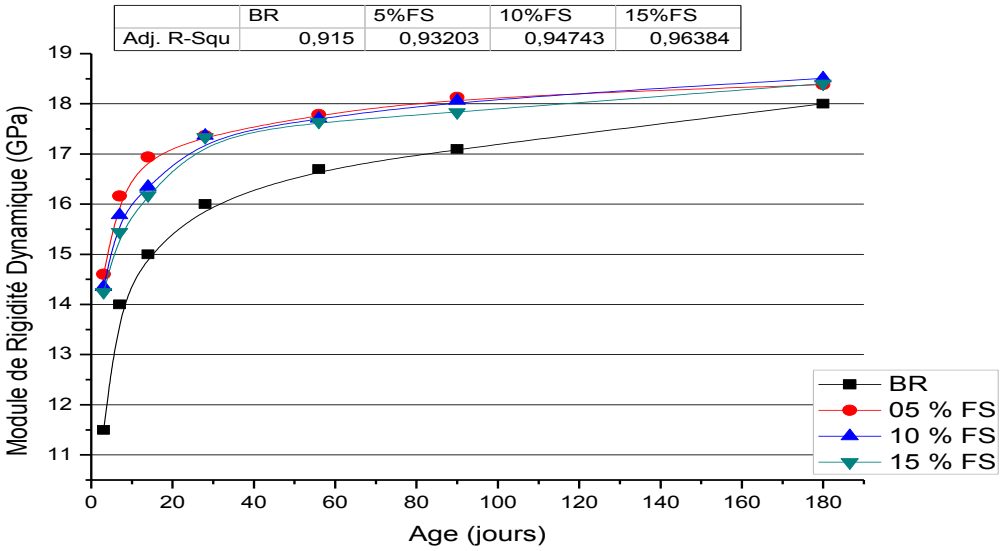

Figure 4.5 : Influence de la fumée de silice sur le module de rigidité dynamique G_d

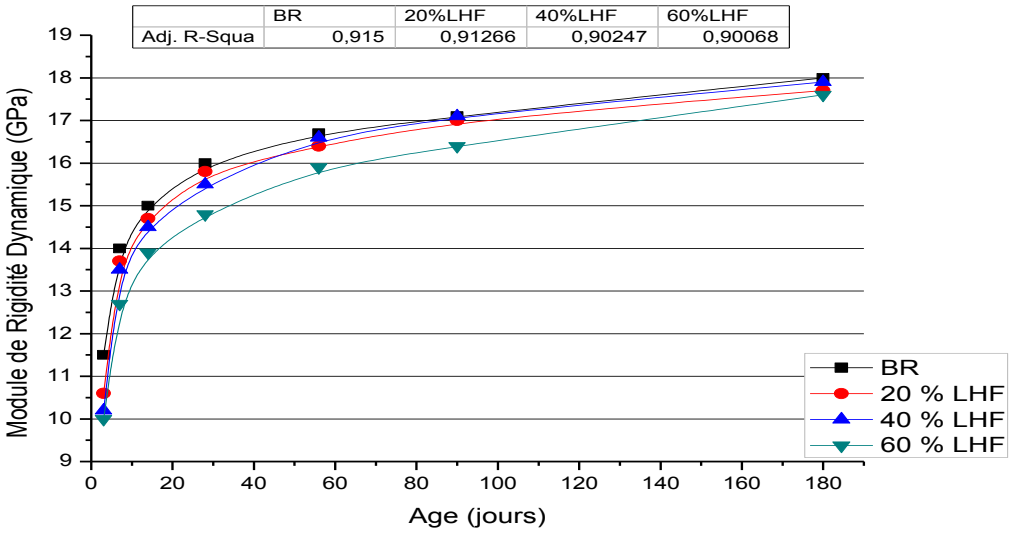

Figure 4.6 : Influence du laitier de haut fourneau sur le module de rigidité dynamique G_d

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

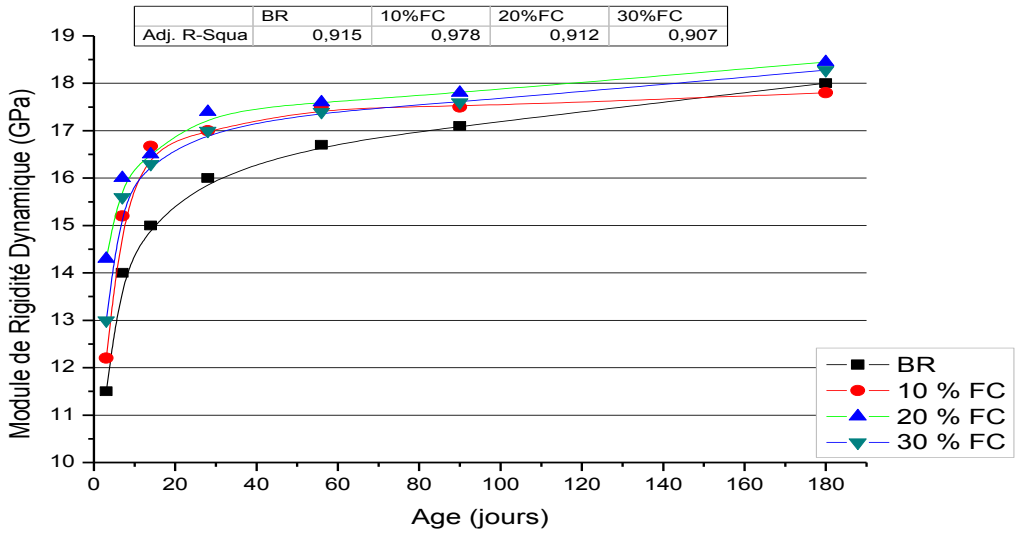

Figure 4.7 : Influence des fillers calcaires sur le module de rigidité dynamique G_d

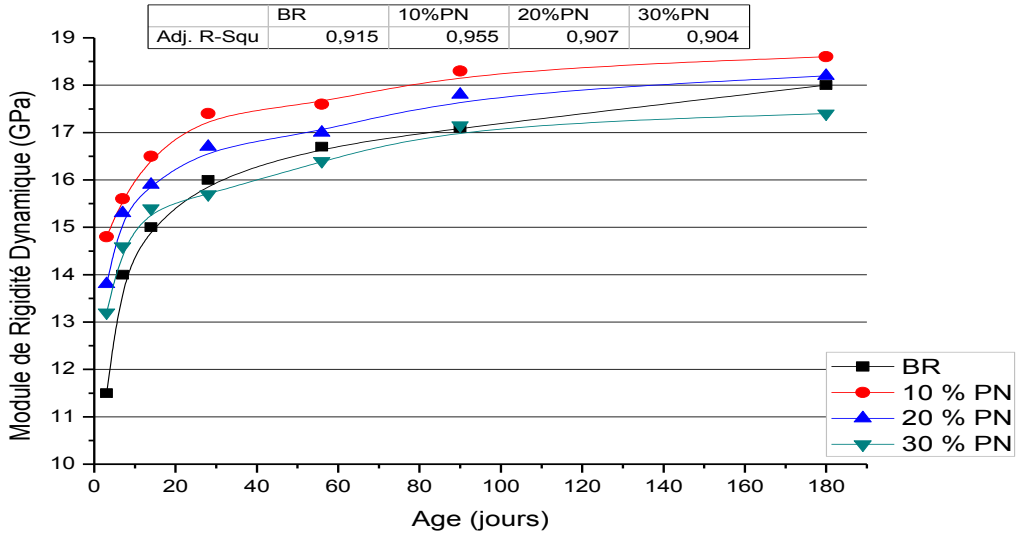

Figure 4.8 : Influence de la pouzzolane naturelle sur le module de rigidité dynamique G_d

4.2.3. Influence des additions sur le coefficient de Poisson

L'effet des additions minérales sur l'évolution du coefficient de Poisson en fonction du temps des bétons est illustré sur les figures 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12. Les tendances des coefficients de Poisson sont globalement comparables pour l'ensemble des formulations. En ce qui concerne les valeurs des coefficients de Poisson, nous constatons qu'elles ont une distribution instable par rapport au temps, parfois descendante et autre fois ascendante et se situent dans un intervalle de [0.18 à 0.41]. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par [Dimitrios, 2009] qui a étudié l'évolution du coefficient de Poisson en fonction du temps sur une pâte de ciment et qui a montré qu'à l'état frais la pâte de ciment se comporte presque comme un matériau

incompressible et le coefficient de poisson était dans un intervalle de [0,28 à 0,40]. [Neville, 2000] préconise une valeur du coefficient de Poisson de 0,2 pour la plupart des bétons.

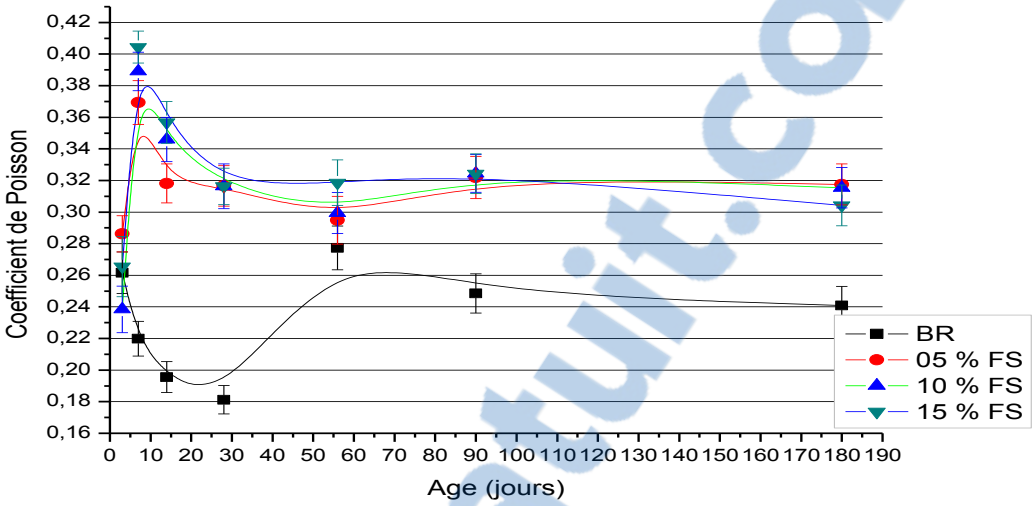

Figure 4.9 : Effet de la fumée de silice sur l'évolution du coefficient de Poisson

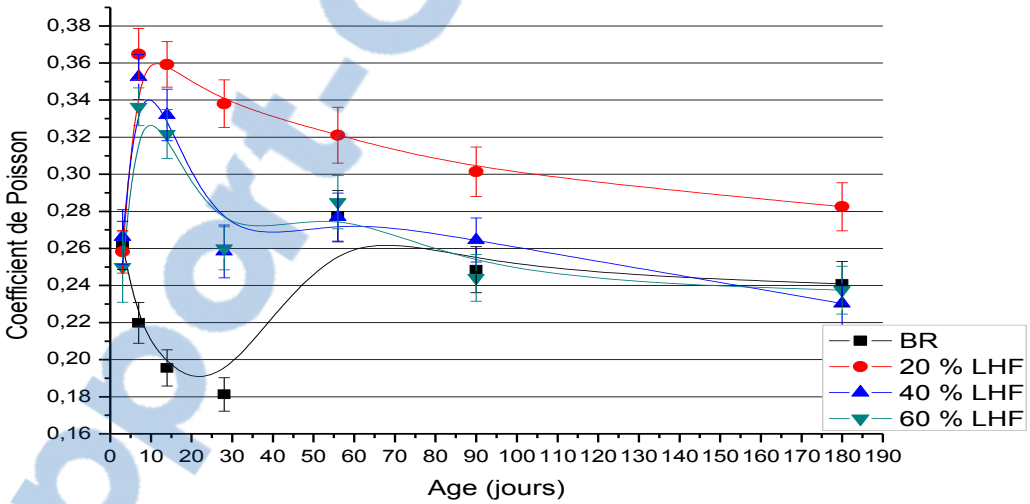

Figure 4.10 : Effet du laitier de haut fourneau sur l'évolution du coefficient de Poisson

Rapport-Gratuit.com

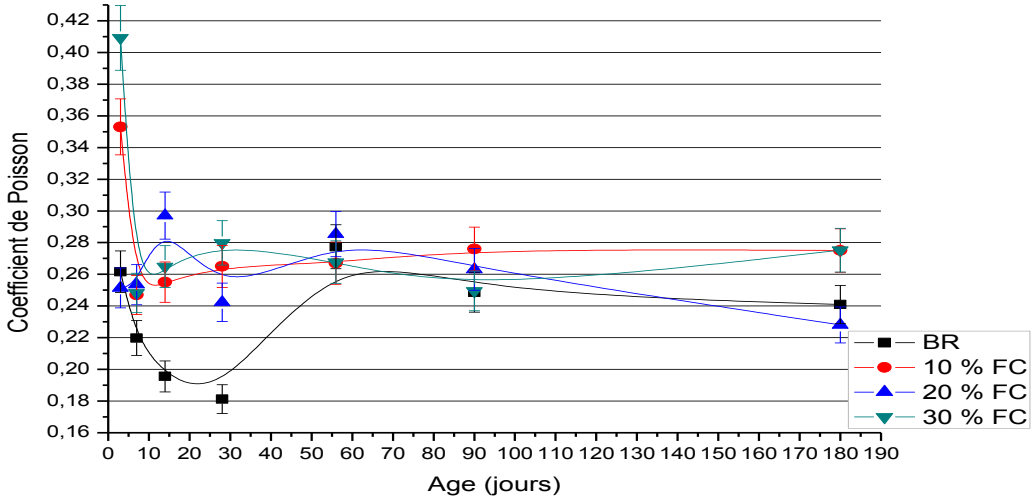

Figure 4.11 : Effet des fillers calcaires sur l'évolution du coefficient de Poisson

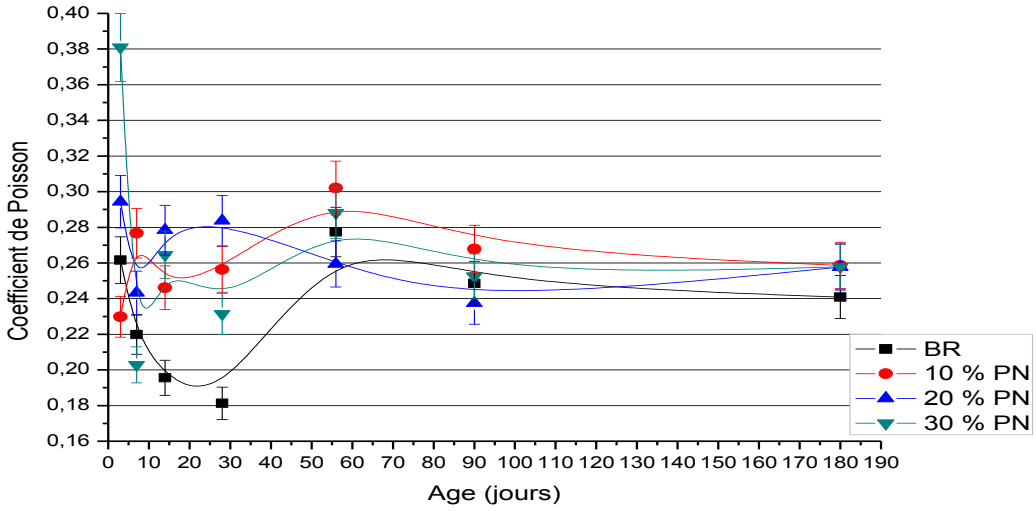

Figure 4.12 : Effet de la pouzzolane naturelle sur l'évolution du coefficient de Poisson

4.2.4. Influence des additions sur la résistance à la compression

Les résultats obtenus en utilisant les essais non destructifs se corrèlent parfaitement avec ceux des essais de compression dont l'analyse a encore une fois montré que les bétons à base de fumée de silice présentent toujours des résistances plus élevées par rapport à tous les autres mélanges étudiés (figures 4.13, 4.14, 4.15 et 4.16). On peut aussi noter que 5% de substitution du ciment par de la fumée de silice permet de donner aux bétons des résistances à 56 jours similaires à celle d'un béton ordinaire de 180 jours de maturation.

Nous avons aussi remarqué que les résistances à 180 jours des bétons avec fumée de silice sont plus élevées d'environ 30% par rapport à celle du béton ordinaire au même âge. Toutefois, il est recommandé d'utiliser un taux de 10% ou 5% de substitution du ciment par la FS. Une telle

tendance est probablement due au fait que la substitution du ciment par la fumée de silice donne une pâte plus compacte ; cela peut également être attribué au phénomène chimique provoqué par la silice vitreuse qui se trouve dans la fumée de silice (FS) et qui réagit avec la chaux présente dans le ciment pour donner le silicate de deuxième génération [Almusallam et al., 2004, Ulucan et al., 2008].

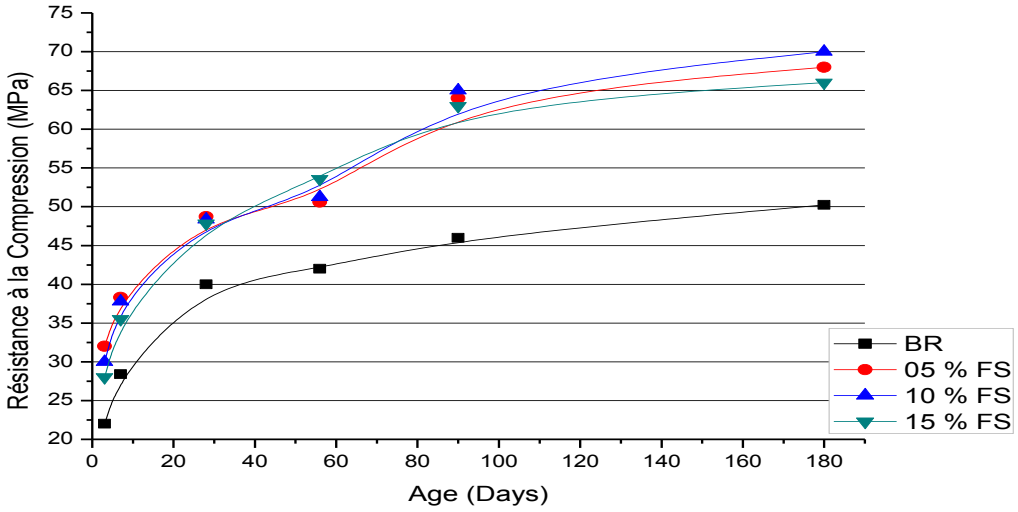

Figure 4.13 : Influence de la fumée de silice sur la résistance à la compression f_{cu}

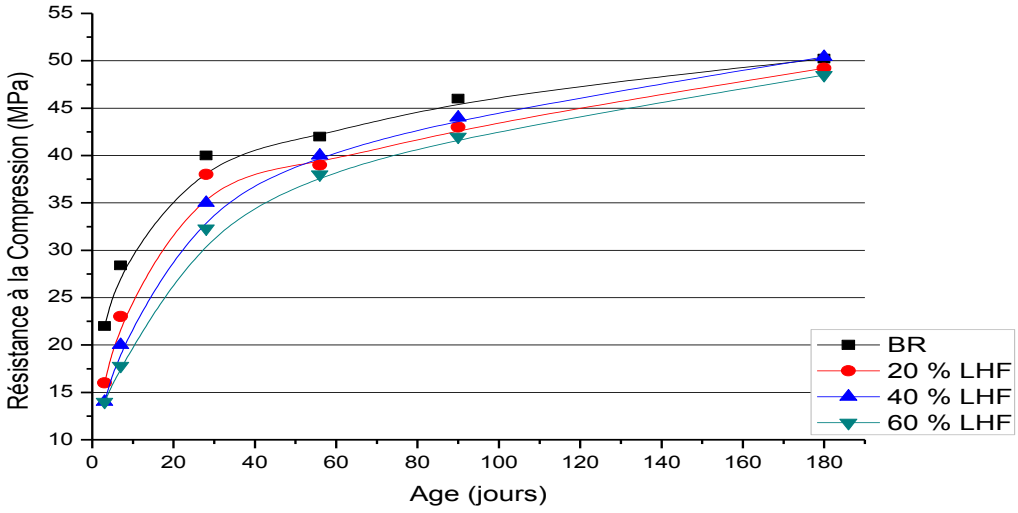

Figure 4.14 : Influence du laitier de haut fourneau sur la résistance à la compression f_{cu}

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

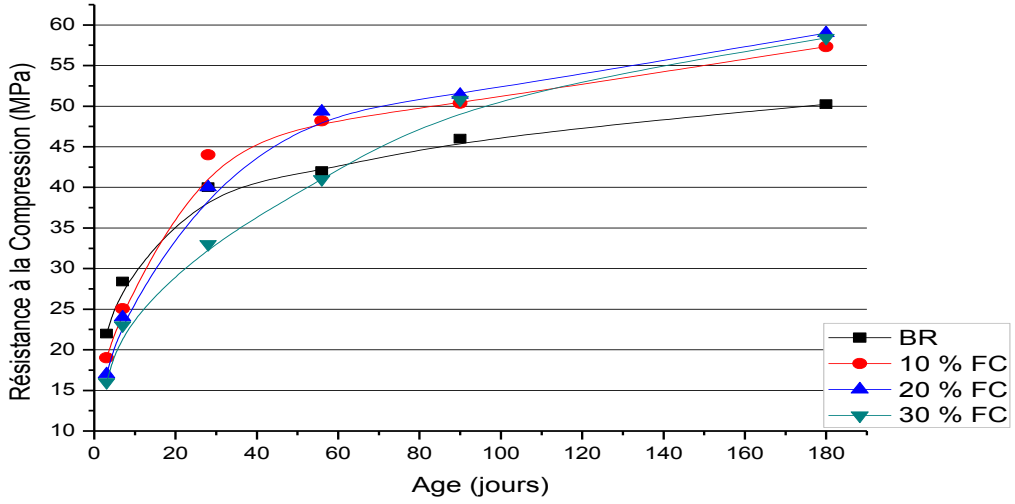

Figure 4.15 : Influence des fillers calcaires sur la résistance à la compression f_{cu}

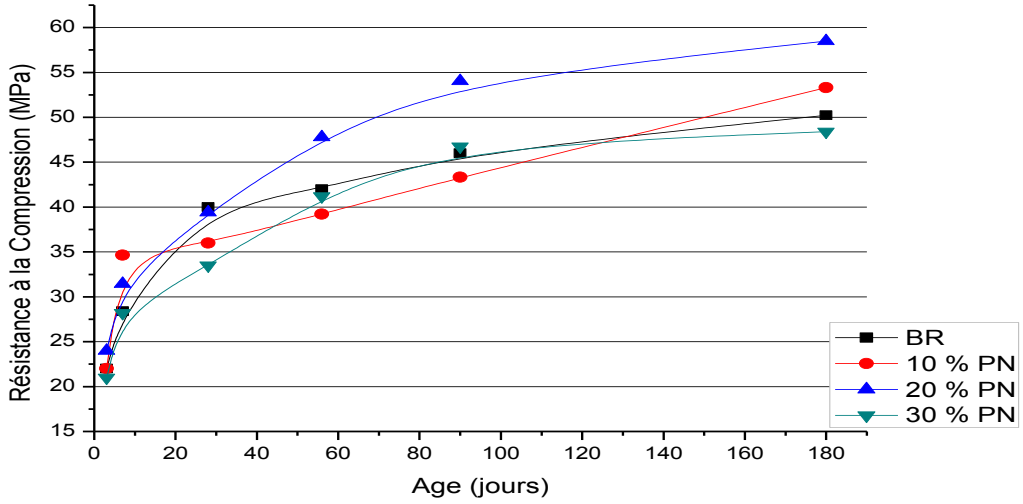

Figure 4.16 : Influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression f_{cu}

Cependant, c'est l'inverse qui s'est produit dans le cas de mélanges de béton avec le LHF, car les résistances à la compression obtenues sont inférieures à celles du béton de référence pendant la période de durcissement. Cette constatation peut s'expliquer, d'une part, par le fait que l'hydratation des laitiers de haut fourneau ne produit pas de portlandite et nécessite donc un activateur, et d'autre part, par la cinétique d'hydratation lente du laitier dont la teneur en chaux est significativement inférieure à celle du ciment (Tableau 3.6).

En outre, les résultats de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours pour des bétons contenant LHF, FC et PN restent comparables à ceux du béton de référence. Cela conduit à une économie significative des coûts des matériaux et d'autres avantages techniques tels que la réduction de la chaleur ainsi que l'amélioration potentielle de la microstructure du béton.

4.2.5. Influence des additions sur la vitesse d'impulsion d'ultrason

Les figures 4.17, 4.18, 4.19 et 4.20 montrent que les additions influent sur les résultats de l'UPV des bétons. Elles montrent aussi que, pour les différents mélanges de bétons préparés, l'UPV à 28 jours se situe entre 3.96 Km/s et 4.36 Km/s, valeurs de l'UPV supérieures à 3.5 Km/s (valeur minimale requise par [Rohit et al., 2012] pour une bonne UPV du béton). Pour les différents bétons utilisés, l'UPV à long terme est plus importante que celle à court terme. Par ailleurs, les bétons aux additions présentent généralement des UPV à long terme plus importantes que celles du béton de référence, sauf pour les mélanges de bétons LHF20, LHF60, et PN30.

Les bétons à base de la fumée de silice présentent des UPV supérieures à cause de sa finesse qui engendre une microstructure plus dense et qui offre aux bétons un empilement granulaire optimal et donc un squelette extrêmement compact à caractéristiques mécaniques élevées.

En plus, sa teneur élevée en silice (95%) (Tableau 3.6) et sa structure vitreuse semblent accélérer l'hydratation initiale de silicate de calcium, ce qui offre aux bétons avec la fumée de silice des UPV supérieures dès le jeune âge.

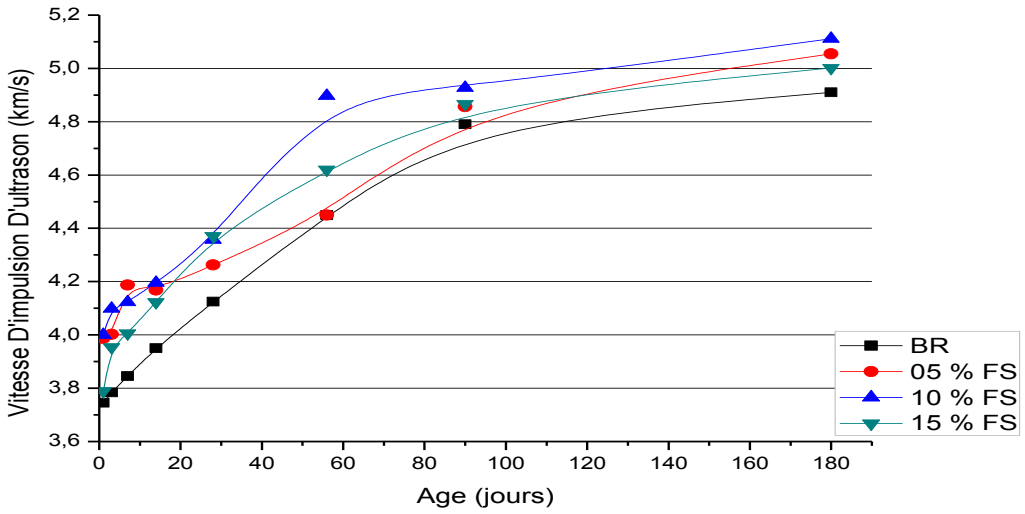

Figure 4.17. Influence de la fumée de silice sur la vitesse d'impulsion d'ultrason V

Les résultats obtenus à partir des essais utilisés montrent que l'hydratation est plus accélérée pour les dosages de 5 et 10% de la fumée de silice. Ce résultat peut être expliqué par les travaux antérieurs qui ont montré que l'ajout de la silice jusqu'à 10% a tendance à consommer la portlandite impliquant l'accélération des réactions d'hydratation. Par contre, cette consommation est freinée pour des dosages de la fumée de silice supérieurs à 10% [BAJJA, 2016]. C'est l'inverse qui s'est produit concernant les mélanges de bétons LHF20, LHF40 et LHF60, les UPV obtenues sont inférieures à celles du béton de référence sur toute la période de durcissement, cela peut être due à la faible chaleur d'hydratation du laitier [Tasdemir et al., 1997] ainsi qu'en raison de la réaction pouzzolanique [Shariq et al., 2013 et Özbay et al., 2016].

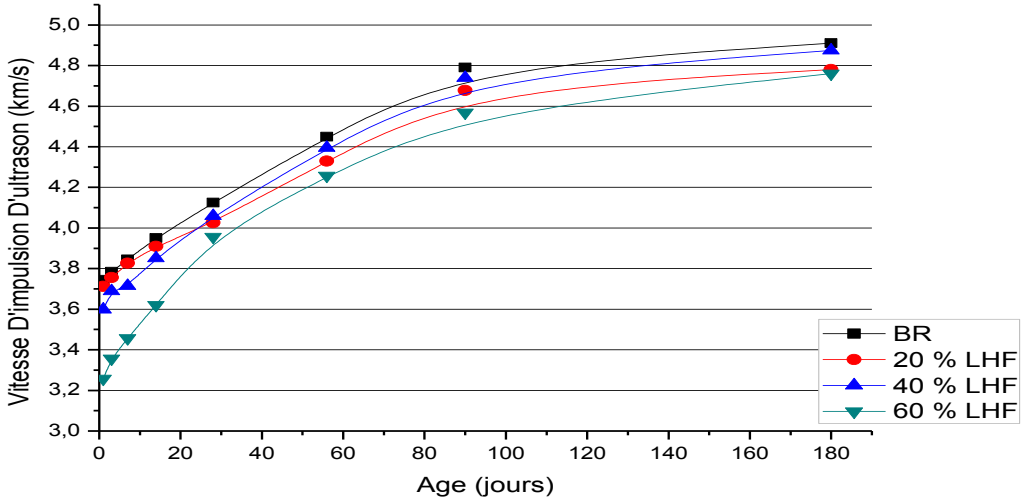

Figure 4.18. Influence du laitier de haut fourneau sur la vitesse d'impulsion d'ultrason V

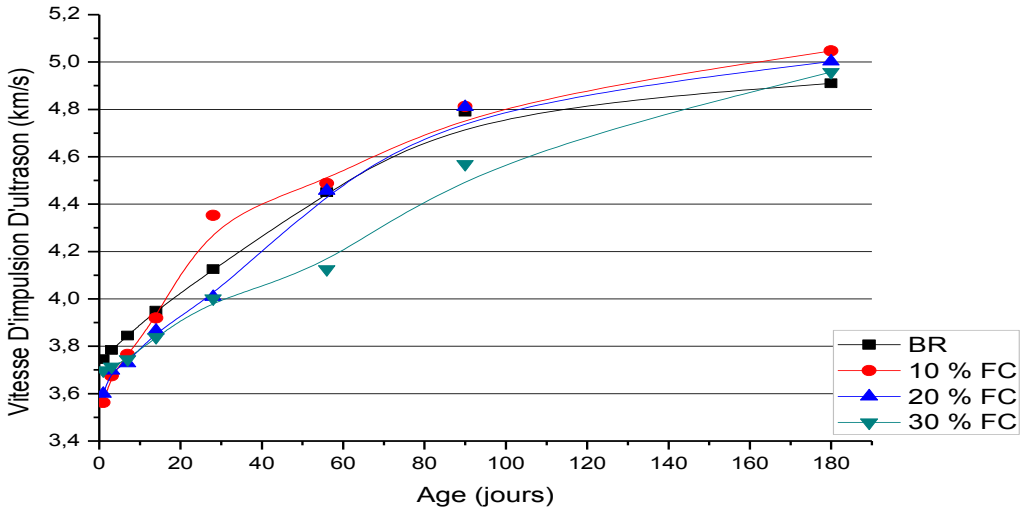

Figure 4.19. Influence des fillers calcaires sur la vitesse d'impulsion d'ultrason V

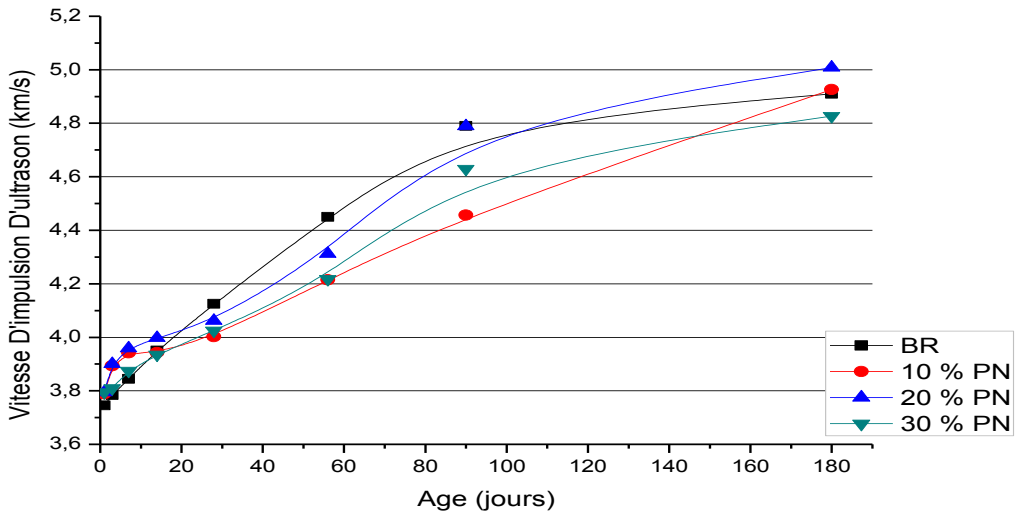

Figure 4.20. Influence de la pouzzolane naturelle sur la vitesse d'impulsion d'ultrason *V*

4.2.6. Effet des additions minérales sur l'évolution de La porosité

L'influence de la fumée de silice, du laitier de haut fourneau, des fillers calcaires et de la pouzzolane naturelle sur l'évolution de la porosité en fonction du temps est clairement illustrée aux figures 4.21, 4.22, 4.23 et 4.24 pour les différents mélanges de béton. La substitution du ciment par la fumée de silice à une influence significative sur la porosité, surtout pour 10% FS.

Nous constatons que la porosité diminue pour tous les mélanges de béton étudiés en fonction du temps, ce qui explique l'augmentation des propriétés dynamiques et mécaniques du béton. En outre, nous constatons que, la substitution du ciment par la fumée de silice, par 40% LHF et par 10% FC réduit la porosité du béton à l'âge de 180 jours.

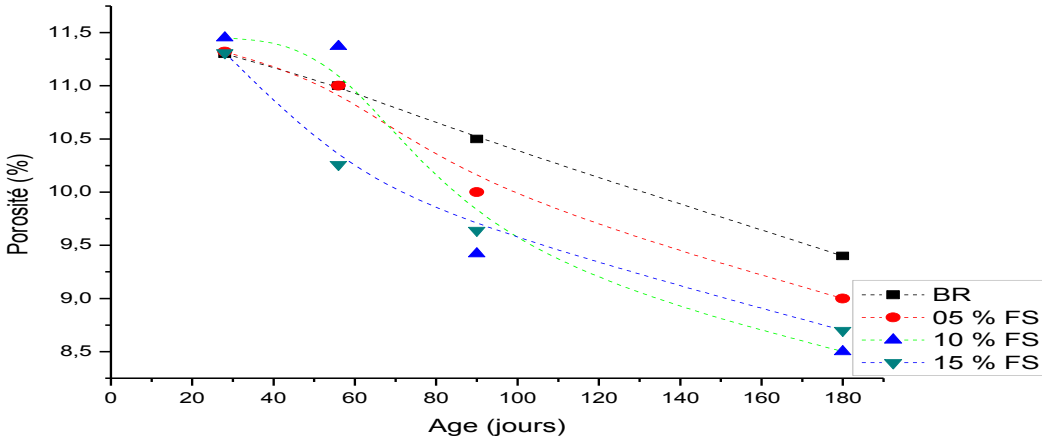

Figure 4.21 : Effet de la fumée de silice sur la porosité en fonction du temps

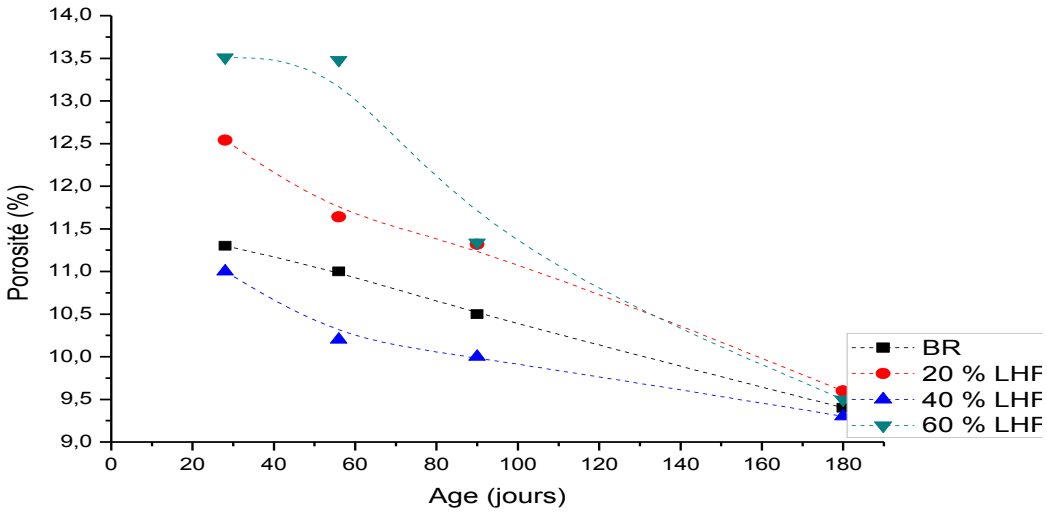

Figure 4.22 : Effet du laitier de haut fourneau sur la porosité en fonction du temps

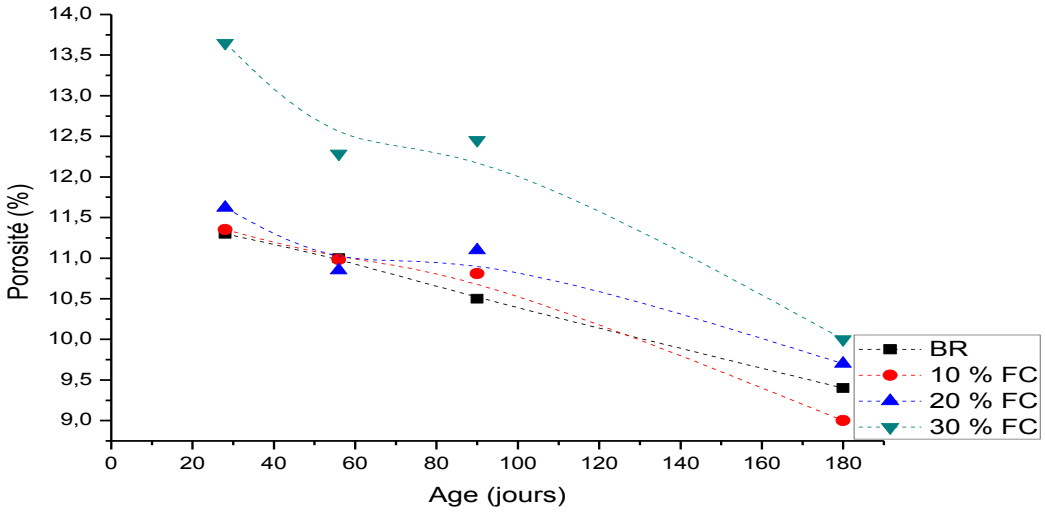

Figure 4.23 : Effet des fillers calcaires sur la porosité en fonction du temps

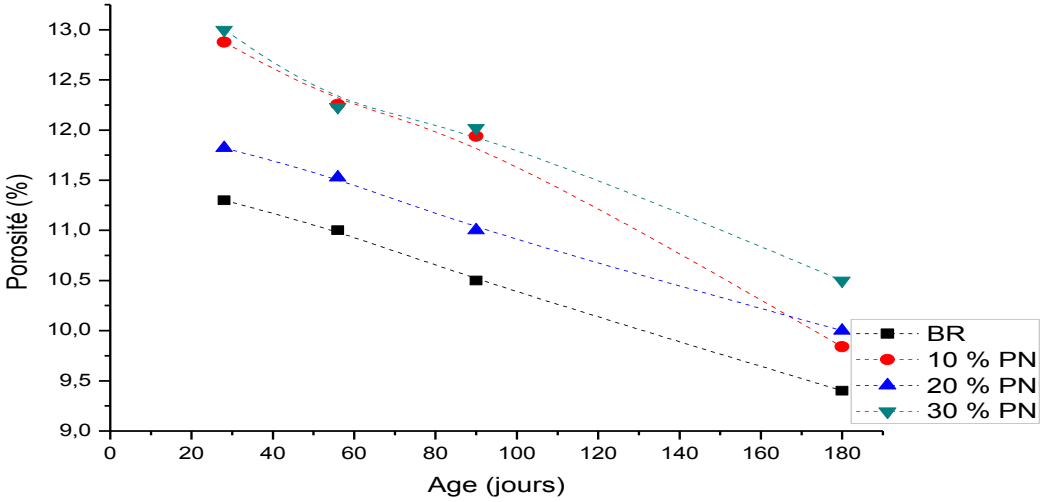

Figure 4.24 : Effet de la pouzzolane naturelle sur la porosité en fonction du temps

4.2.7. Relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression

La variation du module d'élasticité dynamique en fonction de la résistance à la compression est illustrée par la figure 4.25. La corrélation entre E_d(GPa) et la résistance à la compression f_{cu}(MPa) est donnée par l'équation ci-dessous :

$$E_d = 4.36 f_{cu}^{1/2} + 14.45 \qquad (4.1)$$

Dans l'équation (4.1), le coefficient de détermination R^2 est égal à 0,79. Cette valeur est relativement grande, ce qui signifie que le module d'élasticité dynamique des bétons étudiés peut facilement être exprimé en termes de résistance à la compression, à l'aide de l'équation (4.1). Par ailleurs, le modèle trouvé a été comparé au modèle fourni par le British Standard Institution [CP110, 1972] (équation 4.2), au modèle développé par [MegatJohari et al., 2011] (équation 4.3) et à celui trouvé par [Elbahi et al., 2016] (équation 4.4) :

$$E_d = 2.8 f_{cu}^{1/2} + 22 \qquad (4.2)$$

$$E_d = 3.57 f_{cu}^{1/2} + 16.6 \qquad (4.3)$$

$$E_d = 4 f_{cu}^{1/2} + 18 \qquad (4.4)$$

Quand on compare les résultats obtenus, on peut facilement constater que les équations (4.2) et (4.3) sous-estiment quelque peu le module d'élasticité dynamique par rapport à l'équation (4.1), en particulier pour les résistances à la compression supérieures à 24 MPa et 8 MPa respectivement. Le coefficient d'erreur est trouvé égal à 6% entre les équations (4.1) et (4.2) et à 7% entre les équations (4.1) et (4.3). Néanmoins, l'équation (4.4) surestime légèrement le module d'élasticité dynamique par rapport à l'équation (4.1) avec un coefficient d'erreur de 3% pour les équations (4.1) et (4.4).

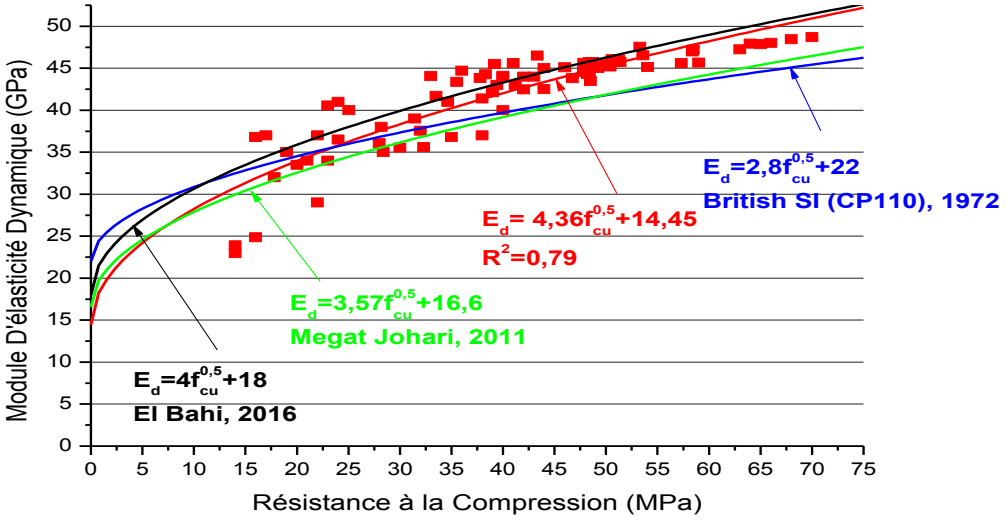

Figure 4.25 : Relation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression

4.2.8. Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique

L'évolution de la vitesse d'impulsion d'ultrason en fonction du module d'élasticité dynamique est présentée sur la figure 4.26. La relation entre V (km/s) et E_d (GPa) est exprimée par l'équation suivante :

$$V = 0.98E_d^{0.40} \qquad (4.5)$$

Cette équation est obtenue avec un coefficient de détermination R^2 de 0,72. Cette valeur élevée de R^2 indique que la vitesse d'impulsion d'ultrason des bétons préparés peut être exprimée en fonction du module d'élasticité dynamique par l'utilisation de l'équation (4.5). Cette équation à la même tendance que celle trouvée par [Iqbal khan, 2012] qui est donnée par :

$$V = 0.3E_d^{0.7} \qquad (4.6)$$

La figure 4.26 regroupe les représentations graphiques des vitesses d'impulsion d'ultrason mesurées V en fonction des modules d'élasticités dynamiques E_d pour les équations (4.5) et (4.6). Comparativement aux valeurs de la vitesse d'impulsion d'ultrason V mesurées, l'équation (4.5) semble surestimer légèrement la vitesse d'ultrason (équation (4.6)), en particulier pour les modules d'élasticités dynamiques E_d inférieures à 52.5 GPa avec un coefficient d'erreur de 6.75 % pour les équations (4.5) et (4.6).

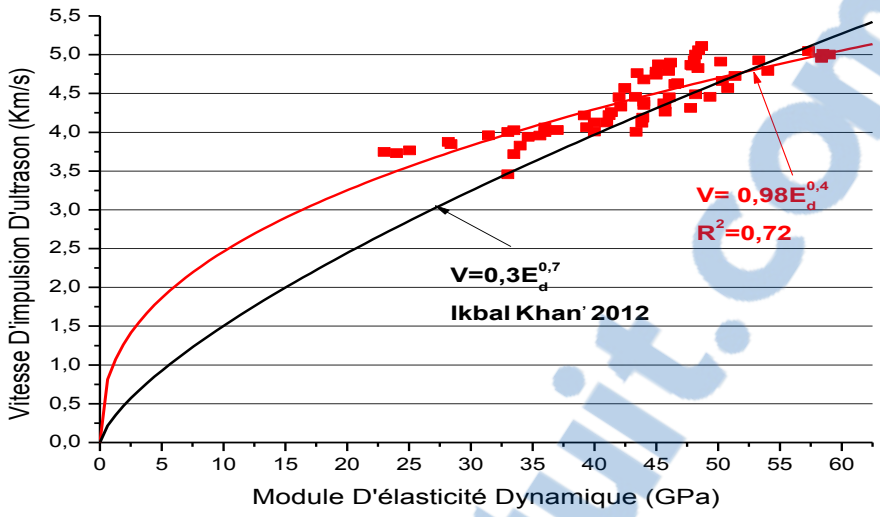

Figure 4.26 : Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique

4.2.9. *Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression*

La vitesse d'impulsion d'ultrason peut être déterminée à partir de l'équation suivante :

$$V(x,t) = \frac{X}{T} \qquad (4.7)$$

Où V(x, t) est la vitesse d'impulsion (km/s), x est la longueur du trajet (mm) et t est le temps de transit (µs).

L'évolution de la vitesse d'impulsion d'ultrason en fonction de la résistance à la compression est présentée sur la figure 4.27. La relation entre V (km/s) et la résistance à la compression f_{cu}(MPa) est exprimée par l'équation suivante :

$$V = 1.55 f_{cu}^{0.278} \qquad (4.8)$$

Cette équation est obtenue avec un coefficient de détermination R^2 de 0.83. Cette valeur élevée de R^2 indique que la vitesse d'impulsion d'ultrason des bétons préparés peut être exprimée avec succès en fonction de la résistance à la compression par l'utilisation de l'équation (4.8). Cette corrélation est similaire à celle du module d'élasticité dynamique en fonction de la résistance à la compression obtenue avec une valeur R^2 légèrement plus faible. Par ailleurs, l'équation (4.8) trouvée à la même tendance que celle obtenue par [Iqbal khan, 2012] donnée par l'équation suivante :

$$V = 1.92 f_{cu}^{0.2} \qquad (4.9)$$

Par conséquent, sur la figure 4.27, nous présentons la vitesse d'impulsion d'ultrason mesurée V en fonction de la résistance à la compression f_{cu} des équations (4.8) et (4.9). En comparaison avec les valeurs mesurées de la vitesse d'impulsion d'ultrason, l'équation (4.9) semble

légèrement sous-estimer la vitesse d'impulsion d'ultrason (équation (4.8)) en particulier pour des résistances en compressions supérieures à 17 MPa, avec un coefficient d'erreur de 6.75% pour les équations (4.8) et (4.9).

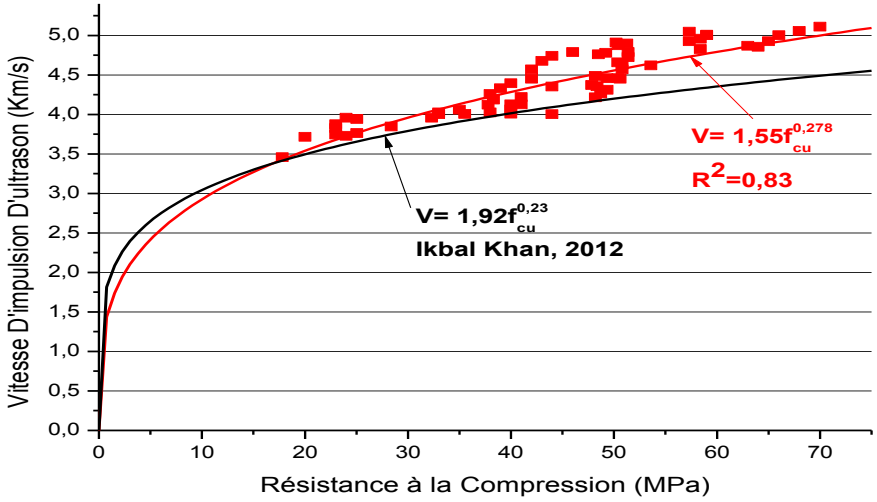

Figure 4.27 : Relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression

4.2.10. Relation entre le module d'élasticité statique et le module d'élasticité dynamique

La figure 4.28 présente la relation entre les modules d'élasticité statiques et dynamiques. Le module d'élasticité statique pourrait être lié au module d'élasticité dynamique par l'équation (4.10) comme suit :

$$E_s = 1.13E_d - 14 \qquad (4.10)$$

Où E_s est le module statique (GPa) et E_d est le module dynamique (GPa).

L'équation (4.10) est obtenue avec un coefficient de détermination R^2 raisonnablement élevé de 0.85, ce qui indique une corrélation statistique potentiellement significative entre les deux modules d'élasticité. Antérieurement, [Elbahi et al., 2016] ont proposé une relation entre les modules d'élasticité statiques et dynamiques pour les bétons ordinaires décrite par l'équation (4.11). Néanmoins, cette équation à tendance à souestimer le module d'élasticité statique par rapport à l'équation (4.10) avec un coefficient d'erreur de 6%.

$$E_s = 0.99E_d - 9.58 \qquad (4.11)$$

[Lyndon et al., 1986] ont précédemment suggéré une relation entre les modules d'élasticité statique et dynamique, pour les bétons ordinaires, comme décrit dans l'équation (4.12). Cependant, cette équation tend à surestimer le module d'élasticité statique, comparé à l'équation (4.10) avec un coefficient d'erreur de 6,5%.

$$E_s = 0.83E_d \qquad (4.12)$$

Dans le BS 8110, une relation générale entre les modules d'élasticité statiques et dynamiques pour des bétons contenant une quantité de ciment ne dépassant pas 500 kg/m^3 est donnée comme suit :

$$E_s = 1.25E_d - 19 \qquad (4.13)$$

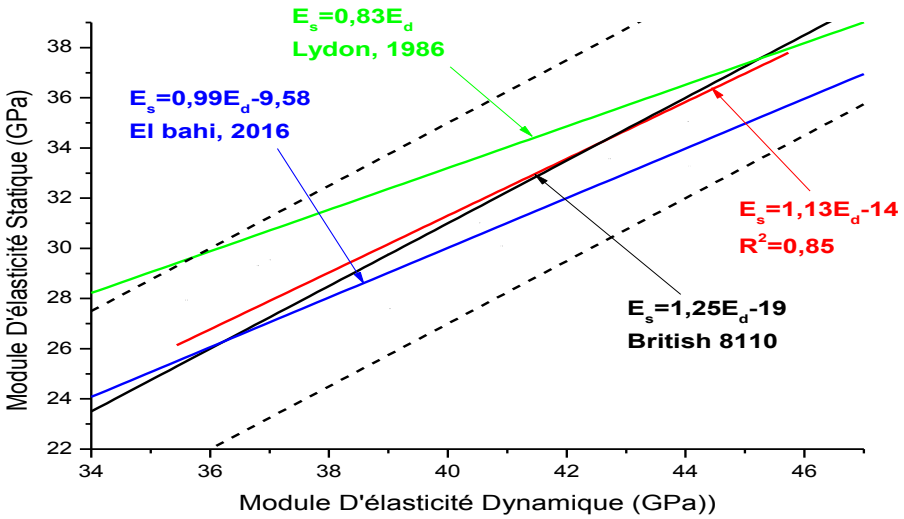

Figure 4.28 : Relation entre le module d'élasticité statique et le module d'élasticité dynamique.

Les valeurs mesurées du module d'élasticité statique sont comparées à celles estimées par les équations (4.11), (4.12) et (4.13) sur la figure 4.28 avec les limites supérieure et inférieure de ± 4 GPa de l'équation (4.13), comme indiqué dans the Code of Practice. Nous constatons que tous les points obtenus se situent à l'intérieure de ces limites. En outre, la valeur calculée du coefficient d'erreur pour le module d'élasticité statique déterminée en utilisant l'équation (4.13) donne une valeur très faible de l'ordre de 2.7%. Cela montre que l'équation (4.10) peut être aisément utilisée pour estimer le module d'élasticité statique à partir du module d'élasticité dynamique du béton.

4.2.11. Relation entre la porosité el la résistance à la compression

Afin de mieux analyser les résultats obtenus, il est nécessaire d'étudier la porosité accessible à l'eau des mélanges étudiés qui reste un paramètre essentiel pour la prévision de la durabilité (Baroghel-bouny 2005).

La figure 4.29 illustre clairement une corrélation significative entre la porosité et la résistance mécanique. On peut aussi constater à travers cette figure que la porosité pour tous les mélanges a tendance à diminuer avec l'âge du béton en raison de la formation continue des hydrates. Cette diminution est plus importante pour les bétons avec la fumée de silice (FS) car les effets chimiques de cette addition amènent à une microstructure du béton plus homogène et plus dense. En plus, en incorporant la FS dans les bétons, ses particules très fines de forme sphérique

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

et de texture lisse pénètrent et s'empilent dans les vides interstitiels entre les grains de ciment, ce qui engendrera une augmentation de la surface spécifique interne et permettra d'obtenir des mélanges de forte compacité.

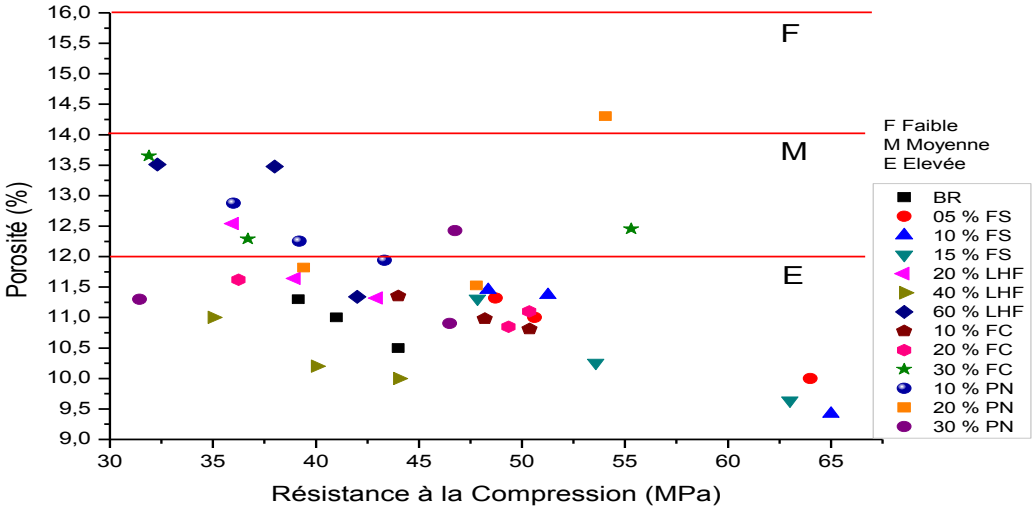

Figure 4.29 : Relation entre la porosité et la résistance à la compression pour l'âge de 28, 56, et 90 jours

Par ailleurs, la substitution du ciment par le laitier de haut fourneau (LHF) a plutôt tendance à augmenter la porosité accessible à l'eau. Cette tendance s'amplifie au-delà de 40% de substitution. La fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les fillers calcaires semblent être plus efficaces pour réduire la porosité que la pouzzolane naturelle. La porosité est généralement réduite avec les additions, en particulier à l'âge de 90 jours. Toutefois, la figure 4.29 montre que nos bétons se trouvent en général dans la classe de durabilité moyenne à élevée.

4.3. Conclusions

Cette étude à caractère expérimentale a permis de mettre en évidence l'influence de la fumée de silice, des laitiers de haut fourneau, des fillers calcaires et de la pouzzolane naturelle sur les caractéristiques physiques, dynamiques et mécaniques des bétons et d'en déduire les principales corrélations qui peuvent exister entre ces paramètres. Les principaux résultats obtenus sont résumés comme suit :

- L'incorporation de la fumée de silice a permis de créer une microstructure très dense, qui conduit à un empilement granulaire optimal offrant au béton un module d'élasticité dynamique et une résistance mécanique élevés. Un optimum de 10% de la FS est recommandé pour obtenir les meilleures performances.

- La substitution du ciment par les laitiers de haut fourneau ne sera pas sans conséquences sur le module d'élasticité dynamique et les caractéristiques mécaniques du béton à cause de la teneur en chaux plus faible dans les LHF et qui a tendance à ralentir le phénomène de

l'hydratation. Un taux maximal de 40% de LHF ressort de notre étude. Au-delà de ce seuil, la porosité du mélange devient élevée.

- L'utilisation des fillers calcaires et de la pouzzolane naturelle a une influence significative sur le module d'élasticité dynamique, la vitesse d'impulsion d'ultrason et sur la résistance à la compression.

- Les résultats de cette recherche montrent aussi l'efficacité des méthodes non-destructives sur le contrôle de la qualité des bétons avec et sans additions minérales. Des modèles mathématiques prédictifs ont été développés et permettent de mettre en évidence les corrélations significatives entre les différentes grandeurs à savoir : le module d'élasticité dynamique, la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de cette étude était d'étudier l'influence de quatre additions minérales cimentaires (la fumé de silice, le laitier de haut fourneau, les fillers calcaires et la pouzzolane naturelle) sur les propriétés dynamiques et mécaniques des bétons. Pour répondre à cette problématique, nous avons suivi une démarche expérimentale en se basant surtout sur des démarches non destructives, tel que la méthode de la fréquence de résonance et la vitesse d'impulsion d'ultrason.

Dans le cadre de ce travail nous avons adopté deux dispositifs expérimentaux :

1- L'ERUDITE qui a permis de déterminer les facteurs dynamiques à savoir : le module d'élasticité dynamique, le module de rigidité dynamique et le coefficient de Poisson. Ces grandeurs sont utilisées dans le calcul, la conception et le contrôle des structures.
2- LE PUNDITLAB, qui a permis de caractériser le béton à travers la mesure de la vitesse d'impulsion d'ultrason (UPV) qui reste la méthode la plus recommandée parmi les méthodes non destructifs pour estimer les propriétés physiques et mécaniques.

Dans un premier temps, notre recherche a confirmé les résultats des recherches antérieures qui ont permis d'élaborer des corrélations entre plusieurs grandeurs comme la vitesse d'impulsion d'ultrason et la résistance à la compression, la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique, le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression, le module d'élasticité statique et le module d'élasticité dynamique et ou encore entre la porosité et la résistance à la compression des bétons.

Les résultats obtenus ont permis d'aboutir à un certain nombre de conclusions qui sont résumées dans les points suivants :

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- L'incorporation des additions minérales dans les bétons a une influence significative sur le module d'élasticité dynamique, la résistance à la compression, la vitesse d'impulsion d'ultrason. Les résultats ont montré que la substitution de 10% du ciment par de la fumée de silice, des fillers calcaires ou par la pouzzolane augmente rapidement le module d'élasticité dynamique aux jeunes âges. Par contre les laitiers de haut fourneau n'ont pas donné le même effet.

- Par ailleurs, les résultats montrent également qu'en utilisant les proportions de mélange appropriées, il est possible de réduire la quantité de ciment à des pourcentages atteignant les 20%. A ce titre, nous avons trouvé que la résistance à la compression à 28 jours fluctuait entre 31 MPa à 47 MPa, c'est-à-dire des valeurs nettement supérieures à 25 MPa valeur

recommandée par la note de calcul en Algérie. Cela conduit à une économie significative du coût du mélange, en plus des avantages techniques supplémentaires que peut engendrer l'utilisation de ces additions minérales telle que la réduction de la chaleur d'hydratation ou encore l'amélioration potentielle des performances de durabilité.

- Une nouvelle relation entre La vitesse d'impulsion d'ultrason V (Km/s) et le module d'élasticité dynamique E_d(GPa) a été déterminée avec un coefficient de détermination R^2 acceptable de l'ordre de 0,72. Cette valeur du coefficient de détermination indique que la vitesse d'impulsion d'ultrason des bétons préparés peut être exprimée aisément en fonction du module d'élasticité dynamique.

- Une autre relation entre le module d'élasticité dynamique E_d (GPa) et la résistance à la compression f_{cu} (MPa) a aussi été déterminée. A partir de son coefficient de détermination R^2 de 0,79, on peut clairement noter que le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression sont relativement liés.

- Une troisième relation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason V (Km/s) et la résistance à la compression f_{cu} (MPa) a été trouvée et présentant un coefficient de détermination R^2 assez élevée de l'ordre de 0.83. Cette valeur indique que la vitesse d'impulsion d'ultrason des bétons peut être exprimée avec succès en fonction de la résistance à la compression.

- Le module d'élasticité statique du béton E_s (GPa) peut aussi être exprimé en fonction du module d'élasticité dynamique E_d (GPa). L'équation proposée est obtenue avec un coefficient de détermination R^2 raisonnable de l'ordre de 0.85, ce qui indique une corrélation statistique assez significative entre les deux modules d'élasticité.

- La porosité est réduite généralement avec les ajouts surtout à 90 jours. Selon les classes et valeurs limites relatives aux indicateurs de durabilité établies par Baroghel-Bouny, les résultats trouvés montrent que nos bétons se trouvent en général dans les classes de durabilité potentielle moyenne et élevée.

PERSPECTIVES

Notre investigation laisse la porte ouverte sur d'autres contributions à l'avenir afin d'enrichir cette recherche par des travaux complémentaires :

- Etude de l'effet de la température sur les caractéristiques dynamiques du béton.
- Utilisation d'autres méthodes non destructives.
- Utilisation d'autres types d'additions minérales.

- Chercher un modèle numérique basé sur le principe des réseaux des neurones artificiels en vue de prédire la résistance à la compression des bétons grâce aux mesures de leurs caractéristiques dynamiques par la méthode de la fréquence de résonance.
- Les mesures expérimentales présentées dans cette thèse ont été réalisées dans des conditions optimales de laboratoire, il serait souhaitable à l'avenir de prendre directement des mesures sur ouvrage réel.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. [ACI 228, 1998]: ACI Committee 228, Nondestructive Testing of Concrete. (1998). Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures. American Concrete Institute.
2. [ACI 233R-03, 2003]: American Concrete Institute (ACI), (2003). Slag cement in concrete and mortar. ACI Committee 233.
3. [ACI 318-1989]: ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-89 / ACI 318R-89), American Concrete Institute, Detroit, (1989), 353 pp.
4. [ACI 363-84, 1993]: American Concrete Institute, High Strength Concrete ACI 363-84. ACI Manual of Concrete Practice (Part 1), Detroit, MI; ACI Committee 363, 1993.
5. [AFNOR, 2002]: Afnor, Concrete and its constituents. Tome 2: test methods of concrete. 5th ed. Paris: French Association of Normalization; (2002). p. 510.
6. [AFPC-AFREM, 1997] : Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité. Compte-rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM Durabilité des Bétons, Toulouse, France, 11-12 déc. (1997).
7. [Almusallam et al., 2004]: Almusallam A.A., Beshr H., Maslehuddin M., Al-Amoudi O.S.B., Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate concrete. Cement & Concrete Composites (2004); 26 (7):891–900.
8. [ASTM C 215, 2003]: ASTM C 215-02,Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, (2003).
9. [ASTM C39, 2013]: ASTM C39-12, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards: 23-29. (2013).
10. [ASTM C597, 2003]: ASTM C597-02, Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, Annual Book of ASTM: Standards, Vol. 04.02, West Conshohocken, PA, (2003).
11. [ASTM C597, 2003]: ASTM C597-09, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA. (2003).
12. [Bajja, 2016]: BAJJA Z., Influence de la microstructure sur le transport diffusif des pâtes, mortiers et bétons à base de CEM I avec ajout de fumée de silice. (2016). Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay. 241p.
13. [Baroghel-bouny, 2005]: Baroghel-bouny V., New approach to concrete durability. Methodology and examples." Eng. Tech. Ed 2246: 1-18.(2005).
14. [Baroghel-Bouny, 2013] : Baroghel-Bouny V., Classes de durabilité « potentielle » et valeurs expérimentales de porosité accessible à l’eau en fonction de la résistance moyenne à la compression (2013).

15. [Baron et Lesage, 1969] : Baron J., Lesage R., Compacité et maniabilité des bétons hydrauliques, Rapport de recherche des LCPC N° 3, Paris, Août (1969).
16. [Baron, 1976] : Baron J., Lesage R., La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier, Rapport de recherche des LCPC N° 64, Paris, Décembre (1976).
17. [Bederina et al., 2011]: Bederina M., Makhloufi Z., Bouziani T., Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete, Physics Procedia 21 (2011), 28 – 34.
18. [Benedetti, 1998]: Benedetti A., On the ultrasonic pulse propagation into fire damaged concrete, ACI Struct. J., 95(3), 259, (1998).
19. [Bordas, 1983]: Collection Bordas-Dunod., Recommandations pour l'emploi de la méthode de fréquence de résonance dans le contrôle des éprouvettes en béton, RILEM recommandation on non-destructive testing methods, Vol. 16 – N° 95 - Matériaux et Constructions, (1983).
20. [Boukli Hacene, 2010] : Boukli Hacene S.M.A., Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen. Thèse de Doctorat de l'Université de Tlemcen, 194 p, (2010).
21. [Brooks et al., 1983]: Brooks J.J., Wainwright P.J., Properties of ultra-high-strength concrete containing a superplasticizer. Mag. Conc. Res. (1983); 35(125):205–13.
22. [BS, 1881]: BS 1881, Part 203, Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, British Standards Institution, London, (1986).
23. [Bullock et al., 1959]: Bullock R.E., Whitehurst E.A., Effect of certain variables on pulse velocities through concrete, Highway Res. Board Bull., 206, 37, (1959).
24. [Burghardt, 2000]: Burghardt R.C., Evaluation of concrete structures. Communication privée, RILEM, NDT (2000).
25. [Caquot, 1937] : Caquot A., Rôle des matériaux inertes dans le béton, mémoire de la société des ingénieurs civils de France, pp. 562-582, Juillet-Août (1937).
26. [Carrasquillo, et al., 1980]: Carrasquillo R. L., Nilson A. H. & Slate F. O., High-Strength Concrete: An Annotated Bibliography 1930–1979. Cement Concrete and Aggregates, 2(1), 3-19. (1980).
27. [Celic et al., 2015]: Celik K., Meral C., Gursel A.P., Mehta P.K., Horvath A., Monteiro P.J. Mechanical properties, durability and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. Cement and Concrete Composites, 56, 59-72. (2015).
28. [Cherait et al., 2006]: Cherait Y., Nafa Z., Éléments de matériaux de construction et essais. pp.495, université 8 Mai 45 Gualma. (2006).
29. [Conyers et al., 1998]: Conyers L.B., Cameron C.M., Ground-penetrating radar techniques and three-dimensional computer mapping in the American Southwest. Journal of Field Archaeology, 25(4), 417-430. (1998).
30. [Corapcioglu et al., 1996]: Corapcioglu M., Yavuz and Kagan Tuncay., Propagation of waves in porous media. Advances in porous media 3; 361-440. (1996).
31. [CP110, 1972]. British Standard Institution. CP110. Part 1, The structural use of concrete: Design, materials and workmanship. BSI. London; (1972).

32. [de Larrard, 2000]. de Larrard F., Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A., Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p, (2000).
33. [Deboucha et al., 2015]: Deboucha W., Oudjit M.N, Bouzid A., Belagraa L., Effect of Incorporating Blast Furnace Slag and Natural Pozzolana on Compressive Strength and Capillary Water Absorption of Concrete. Procedia Engineering 108 (Supplement C): 254-261.(2015).
34. [Demirboğa et al., 2004]: Demirboğa R., Türkmen İ. & Karakoc M.B., Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete. Cement and concrete research, 34(12), 2329-2336. (2004).
35. [Dimitrios et al., 2009]: Dimitrios G., Shiotani T., Experimental Study of Wave Propagation through Grouted Concrete, ACI Materials Journal, V. 106, No. 1, January-February (2009).
36. [Elbahi et al., 2016]: Elbahi B. and Boukli Hacene S.M.A., Influence of limestone fillers and natural pozzolan on engineering properties of concrete. Journal of Adhesion Science and Technology, (2016). 30(16): p. 1795-1807.
37. [EN 197, 2001] : EN 197-1., Ciment-Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. AFNOR, Paris. (2001).
38. [EN 206, 2004] : EN 206-1, Béton–Partie 1: Spécification, performances, production et conformité. (2004).
39. [Faury et al., 1942] : Faury J., Caquot A., Le béton : influence de ses constituants inertes, règles à adopter pour sa meilleure composition. Dunod, Paris, (1942).
40. [Gesoglu et al., 2007]: Gesoglu M., Ozbay E., Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems. Materials and Structure. (2007); 40:923– 937.
41. [Ghrici et al., 2006]: Ghrici M., Kenai S., Meziane E., Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana. Journal of Materials Science, 41(21), (2006); 6965-6972.
42. [Giner et al., 2012]: Giner V.T., Baeza F.J., Ivorra S., Zornoza E., Galao O., Effect of Steel and Carbon Fiber Additions on the Dynamic Properties of Concrete Containing Silica Fume, Materials and Design, Vol. 34, p. 332–339, (2012).
43. [Grosse et al., 2008]: Grosse C.U., Ohtsu M., Acoustic emission testing. Springer Science & Business Media. (2008).
44. [Guneyisi et al., 2004]: Güneyisi E., Gesoğlu M., Özturan T., Properties of rubberized concretes containing silica fume. Cement and Concrete Research, 34(12), 2309-2317 (2004).
45. [Han et al., 2004]: Han S.H., Kim J.K., Effect of temperature and age on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete. Cement and concrete research, 34(7), 1219-1227. (2004).
46. [Hogan et al., 1981]: Hogan F.J, Meusel. J.W., Evaluation for durability and strength development of a ground granulated blast-furnace slag, Cem. Concr. Aggregates 3(1), 40–52 (1981).

Rapport-Gratuit.com

47. [Hornibrook, 1939]: Hornibrook F.B., Application of sonic method to freezing and thawing studies of concrete, ASTM Bull. No. 101, December (1939), 5.
48. [Ilker et al., 2008]: Ilker B.T., Mustafa S., Prediction of mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume using artificial neural networks and fuzzy logic, Computational Materials Science, 42(1), 74- 82 (2008).
49. [Jone, 1957]: Jones R., The effect of frequency on the dynamic modulus and damping coefficient of concrete, Mag. Concr. Res. (London), 9(26), 69, (1957).
50. [Jones, 1954]: Jones R., Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique, RILEM Int. In :Symp. on Nondestructive Testing of Materials and Structures, Paris. 1954.
51. [Jones, 1962]: Jones R., Non-Destructive Testing of Concrete, Cambridge University Press, London, (1962).
52. [Jones et al., 1969]: Jones R., Facaoaru I., Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method, Mater. Struct. Res. Testing (Paris), 2(19), 275, (1969).
53. [Kaplan, 1958]: Kaplan M.F., Compressive strength and ultrasonic pulse velocity relationships for concrete in columns, ACI J., 29(54-37), 675, (1958).
54. [Kaplan, 1959]: Kaplan M.F., The effects of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete, Mag. Concr. Res., 11(32), 85, (1959).
55. [Iqbal Khan, 2012]: Iqbal Khan M., Khan M. I., Evaluation of non-destructive testing of high strength concrete incorporating supplementary cementitious composites, Resources, Conservation and Recycling 61 (2012) 125– 129. (2012).
56. [Lacroix et al., 2002]: Lacroix R., Clément J.L., Propriétés des bétons armés et précontraintes. Hermès Science Publications, Paris, France, 317 p. (2002).
57. [Lothenbah et al., 2008]: Lothenbach B., Le Saout G., Gallucci E., Scrivener K., Influence of limestone on the hydration of Portland cements. Cement and Concrete Research, (2008). 38(6): p. 848-860.
58. [Lydon et al., 1986]. Lyndon F.D., Balendran R.V., Some observations on elastic properties of plain concrete. Cem. Concr. Res.; 16:314–24, (1986).
59. [Malhotra, 1976]: Malhotra V.M., Testing hardened concrete: nondestructive methods, ACI Monogr. No. 9, American Concrete Institute, Detroit, (1976), 109.
60. [Malhotra, 2006]: Malhotra V.M. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials. Lamond, Joseph F. and Pielert James H., editors. ASTM International. West Conshohocken, PA, USA, p. 314-334. (2006).
61. [Malhotra et al., 2004]: Malhotra V. and Carino N.J., Handbook on nondestructive testıng of concrete, 2. Edition, ASTM international West conshohocken. (2004).
62. [Mazloom et al., 2004]: Mazloom M., Ramezanianpour A.A., Brooks J.J., Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. Cement & Concrete Composites (2004); 26 (4):347–57.
63. [Megat Johari et al., 2011]: Megat Johari M.A., Brooks J.J., Kabir S., Rivard P., Influence of Supplementary Cementitious Materials on Engineering Properties of High Strength Concrete, Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 2639–2648, (2011).

64. [Mouli et al., 2008]: Mouli M., Khelafi H., Performance characteristics of light weight aggregate concrete containing natural pozzolan. Building and Environment 43(1): 31-36. (2008).
65. [Neville, 2000] : Neville A. M., Propriétés des bétons. Éditions Eyrolles. ISBN 2-212-01320- 5, France, 806 p. (2000).
66. [NF EN 196, 2006]: NF EN 196-1., Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques- Methods of testing cements–part 1: determination of mechanical strengths-. (2006).
67. [NF EN 196, 2006]: EN NF 196-3., Méthodes d'essais des ciments–Partie 3: Détermination du temps de prise et de la stabilité (March). Comité Européen de Normalisation (CEN), AFNOR, Paris, France (2006).
68. [NF EN 196, 1990]: NF EN 196-6., Methods of testing cement -Determination of fineness. (1990).
69. [NF EN 933, 1997] : EN 933-1., Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-Partie 1: détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage. AFNOR. (1997).
70. [NF P 18- 406, 1981]: Norme française NFP 18-406., Béton : Essai de compression, AFNOR, Paris, (1981).
71. [Norambuena et al., 2010]: Norambuena-Contreras J., Castro-Fresno D., Vega-Zamanillo A., Celaya M., Lombillo-Vozmediano I., Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test. Ndt & E International, 43(7), (2010); 629-634.
72. [Obert et al., 1941]: Obert L., Duvall W.I., Discussion of dynamic methods of testing concrete with suggestions for standardization, Proc. ASTM, 41, 1053, (1941).
73. [Orchard, 1979]: Orchard D. F., 4th ed., Concrete Technology, vol. 1, Applied Science Publ., London, (1979), p. 487.
74. [Özbay et al., 2016]: Özbay E., Erdemir M. and Durmuş H.İ., Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties–A review. Construction and Building Materials 105: 423-434. (2016).
75. [Popovics et al., 1991]: Popovics S., Popovics J.S., Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete, RILEM Mater. Struct., 24, 15, (1991).
76. [Popovics, 1975]: Popovics S., Verification of relationships between mechanical properties of concrete like materials. Materials and Structures. Vol. 8. No. 45. pp. 183-191, (1975).
77. [Power, 1938]: Powers T.C., Measuring Young's modulus of elasticity by means of sonic vibrations, Proc. ASTM, 38, Part II, 460, (1938).
78. [Ramezananpour et al., 2010]: Ramezanianpour A.A., Ghiasvand E., Nikseresht I., Moodi F., Kamel M.E., Engineering Properties and Durability of Concretes Containing Limestone Cements. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Italy 28–30 June (2010).
79. [Reeves, 1986]: Reeves C.M., The use of GGBS to produce durable concrete, Improvement of Concrete Durability, Thomas Telford, London, UK, (1986), pp. 59–95.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

80. [RILEM, 1972]: RILEM Recommendation NDT 1., Testing of concrete by the ultrasonic pulse method, Paris, Dec. (1972).
81. [Rohit et al, 2012]: Rohit M., Patel I. and Modhera C., Comparative Study on Flexural Strength of Plain and Fibre Reinforced HVFA Concrete by Destructive and Non Destructive Techniques. International Journal of Engineering and Science 1(2): 42-48. (2012).
82. [Sarkar et al., 1991]: Sarkar S.L., Baalbaki M., Aïtcin P.C. (1991)., Microstructural development in a high-strength concrete containing a ternary cementitious system. Cement, concrete and aggregates, 13(2), 81-87.
83. [Schubert et al., 2008]: Schubert F., Köhler B., Ten lectures on Impact-Echo. Springer Science+Business Media, Fraunhofer Institute for Non-destructive Testing, Dresden, Germany, p. 5-21, (2008).
84. [Shariq et al., 2013]: Shariq M., Prasad, J., Masood A., Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS. Construction and Building Materials 40 (2013) 944–950.
85. [Sharma et al., 2016]: Sharma R., Khan Rizwan A., Effect of Different Supplementary Cementitious Materials on Mechanical and Durability Properties of Concrete. Journal of Materials and Engineering Structures «JMES», (2016), vol. 3, no 3, p. 129-147.
86. [Soutsos et al., 2009]: Soutsos M., Bungey J., Long A., Tickell G., Interpretation of in-situ concrete strength test results. Department of engineering, the university of Liverpool, UK, (2009).
87. [Stanton, 1944]: Stanton T.E., Tests comparing the modulus of elasticity of portland cement concrete as determined by the dynamic (sonic) and compression (scant at 1000 psi) methods, ASTM Bull. No. 131, Dec. (1944), 17. Also, discussion by L.P. Witte and W.H. Price, pp. 20–22.
88. [Swamy, 1975]: Swamy R.N., Bandyopadhyay A.K., The elastic properties of structural lightweight concrete, Proc. Inst. Civ. Engrs., Part 2, 59, pp. 381-94, September (1975).
89. [Taillade et al., 2011]: Taillade F., Quiertant M., Benzarti K., Aubagnac C., Shearography and pulsed stimulated infrared thermography applied to a nondestructive evaluation of FRP strengthening systems bonded on concrete structures. Construction and Building Materials, 25(2), (2011); 568-574.
90. [Taillandier et al., 2013]: Taillandier F., Sbartaï Z.M., Breysse D., Hiérarchisation de la maintenance d'un parc immobilier - Développement méthodologique et étude de cas. 31èmes Rencontres de l'AUGC, ENS Cachan, 29 au 31 mai, (2013).
91. [Taleb, 2017]: Taleb O., Etude du comportement rhéologique des bétons autoplacants locaux. Thèse de doctorat. (2017). 215p.
92. [Taleb et al., 2017]: Taleb O., Ghomari F., Boukli Hacene S.M.A., Kadri E.H., Soualhi H., Formulation and rheology of eco-self-compacting concrete (Eco-SCC). Journal of adhesion science and Technology, 31(3), 272-296. (2017).
93. [Tasdemir et al., 1997]: Tasdemir M.A., Tasdemir. C., Ozbek E., Altay B., Fineness effect of GGBS on the properties and microstructure of concrete, 1st International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, (1997), pp. 198–215, Istanbul, Turkey.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

94. [Tharmaratran et al., 1990]: Tharmaratram K., Tan B.S., Attenuation of Ultrasonic Pulse in Cement Mortar, Cem. Concr. Res., (1990), vol. 20, pp. 335–340.
95. [Thomson, 1940]: Thomson W.T., Measuring changes in physical properties of concrete by the dynamic method, Proc. ASTM, 40, 1113, (1940). Also, discussion by T.F. Willis and M.E. de Reus, pp. 1123–1129.
96. [Tjaronge et al., 2015]: Tjaronge M.W., Irfan U.R., Porosity, pore size and compressive strength of self compacting concrete using sea water. Procedia Engineering, 125, 832-837. (2015).
97. [Toutanji et al., 2004]: Toutanji H., Delatte N., Aggoun S., Duval R., Danson A., Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete. Cement and Concrete Research, 34(2), 311-319. (2004).
98. [Ulucan et al., 2008]: Ulucan Z.Ç., Türk K., Karataş M., Effect of mineral admixtures on the correlation between ultrasonic velocity and compressive strength for self-compacting concrete. Russian Journal of Nondestructive Testing, 44(5), 367-374. (2008).
99. [Vasconcelos et al., 2008]: Vasconcelos G., Lourenço P.B., Alves C.A.S., Pamplona J., Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. Ultrasonics, 48(5), 453-466. (2008).
100. [Wainwright et al., 1986]: Wainwright P.J., Tolloczko J.J.A., Early and later age properties of temperature cycled slag-OPC concretes. Special Publication, 91, 1293-1322. (1986).
101. [Whiting et al., 2003]: Whiting D., Nagi M., Electrical resistivity of concrete - A literature Review 58 p, (2003).
102. [Wild et al., 1995]: Wild S., Sabir B.B., Khatib J.M., Factors influencing strength development of concrete containing silica fume. Cement and Concrete Research (1995); 25 (7):1567–80.
103. [Wu, 1998]: Wu T.T., Lin T.F., The stress effect on the ultrasonic velocity variations of concrete under repeated loading, ACI Mater. J., 95(5), 519, (1998).